

VERS UNE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GES LIÉES AU TRANSPORT AÉRIEN : ÉTUDE
D'ALTERNATIVES POUR UNE MOBILITÉ PLUS DURABLE

Par
Claire Courtois

Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement et développement durable en vue de
l'obtention du grade de maîtrise en environnement (M. Env.)

Sous la direction de François Lafortune

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Février 2020

SOMMAIRE

Mots clés : gaz à effet de serre, changements climatiques, transport aérien, analyse multicritère, mobilité durable

Les gaz à effet de serre d'origine anthropique contribuent au réchauffement planétaire, donc à l'accentuation des changements climatiques. Le transport est l'un des secteurs économiques émettant le plus de gaz à effet de serre et dont les émissions carbonées continuent d'augmenter. Le secteur aérien est principalement concerné avec la problématique de découpler la croissance du secteur de celle de ses émissions. Le report d'une partie du trafic aérien sur le transport ferroviaire ou par autocar est avancé comme solution possible.

Ainsi, l'objectif principal de cet essai était de déterminer les conditions dans lesquelles l'avion pourrait être remplacé par des alternatives de transport plus durables dans divers contextes géographiques. Cet essai a dans un premier temps situé la problématique des transports dans la lutte contre les changements climatiques et notamment appuyé la contribution du secteur aérien aux émissions de gaz à effet de serre actuelles et futures. Les impacts environnementaux des modes de transport ont ensuite été analysés. L'avion et le train sont apparus être des émetteurs de polluants atmosphériques importants. Les trains électriques sont sortis avantagés de cette comparaison, puisque leurs émissions de polluants atmosphériques sont négligeables par rapport aux autres. À la suite, les enjeux économiques et sociaux des quatre moyens de locomotion ont été abordés. Le moyen de locomotion le plus onéreux est la voiture de location, tandis que les déplacements en autocar sont les moins chers. Le secteur aérien a les impacts socioéconomiques les plus positifs, étant donné qu'il génère le plus d'emplois et que les rémunérations en vigueur y sont les plus élevées.

L'outil est une grille d'analyse multicritère développée dans le but d'évaluer la substituabilité d'une liaison aérienne par un autre mode de transport. Il est basé sur la comparaison entre les performances de l'avion et celles des autres options de mobilité. Seule une performance supérieure à celle de l'avion entraîne une évaluation positive d'un critère. De plus, deux critères éliminatoires ont été ajoutés. Pour cette raison, malgré des résultats supérieurs à ceux de l'avion, l'autocar et le train ont quasiment systématiquement été éliminés.

Les conclusions de l'analyse multicritère démontrent qu'en l'état actuel des technologies et des infrastructures, les trains électriques et l'autocar sont les moyens de locomotion les plus environnementalement intéressants pour se substituer à l'avion. Cependant, ils sont pénalisés par la durée effective de leurs trajets. Considérer la durée effective du trajet sous l'angle de la productivité pourrait amener un éclairage différent sur les résultats obtenus. En effet, le train et l'autocar pourraient apparaître plus profitables aux voyageurs, s'ils leur permettent de consacrer plus de temps à leurs activités personnelles en comparaison du temps perdu à attendre dans le cas de l'avion.

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont à mon directeur d'essai, François Lafortune. Ses remarques et ses conseils toujours pertinents furent d'une grande aide pour avancer et mener à bien ce travail.

Merci aussi à mes parents et mes amis pour leur soutien durant ces quelques mois et plus largement tout le long de la maîtrise en environnement.

Enfin, j'aimerais remercier tout particulièrement Marine, Elina et Claire, présentes depuis de nombreuses années et sans qui les études n'auraient pas eu la même saveur.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|----|
| INTRODUCTION..... | 1 |
| 1. LA PROBLÉMATIQUE DES TRANSPORTS DANS LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES | 3 |
| 1.1. L'évolution du climat dans les années à venir..... | 3 |
| 1.1.1. L'effet de serre | 3 |
| 1.1.2. Les gaz qui participent à l'accentuation de l'effet de serre | 3 |
| 1.1.3. Les conséquences attendues de l'accentuation de l'effet de serre sur le climat | 5 |
| 1.2. Portrait global des transports et contribution aux émissions de GES..... | 7 |
| 1.3. Portrait du secteur aérien mondial et contribution aux émissions de GES..... | 10 |
| 2. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES DIFFÉRENTS MODES DE TRANSPORT | 13 |
| 2.1. Analyse comparative des émissions de GES..... | 13 |
| 2.1.1. L'avion | 13 |
| 2.1.2. Le train | 14 |
| 2.1.3. L'autocar | 16 |
| 2.1.4. La location de voiture..... | 17 |
| 2.1.5. Synthèse des résultats | 18 |
| 2.2. Analyse comparative de la pollution atmosphérique..... | 21 |
| 2.2.1. Les types de pollution atmosphériques considérées | 21 |
| 2.2.2. La pollution atmosphérique liée à l'aviation civile | 22 |
| 2.2.3. La pollution atmosphérique liée au transport ferroviaire de voyageurs | 22 |
| 2.2.4. La pollution atmosphérique liée au transport par autocar | 23 |
| 2.2.5. La pollution atmosphérique liée au déplacement en voiture de location..... | 24 |
| 2.2.6. Synthèse des résultats | 25 |
| 3. LES ENJEUX ÉCONOMIQUES ET SOCIAUX DES DIFFÉRENTS MODES DE TRANSPORT .. | 32 |
| 3.1. Le coût d'utilisation pour l'utilisateur | 32 |
| 3.1.1. L'avion | 32 |

| | |
|--|----|
| 3.1.2. Le train | 34 |
| 3.1.3. L'autocar | 35 |
| 3.1.4. La voiture de location..... | 36 |
| 3.1.5. Synthèse des résultats..... | 38 |
| 3.2. Les impacts socioéconomiques des différents modes de transport | 41 |
| 3.2.1. Les emplois générés | 41 |
| 3.2.2. Les revenus..... | 42 |
| 3.2.3. L'influence de la durée du voyage sur le choix du mode de transport..... | 43 |
| 4. ÉLABORATION DE LA GRILLE D'ANALYSE MULTICRITÈRE DE SUBSTITUABILITÉ D'UNE LIAISON AÉRIENNE PAR UN AUTRE MODE DE TRANSPORT | 46 |
| 4.1. Les moyens de transport empruntés | 46 |
| 4.2. Fonctionnement de l'analyse multicritère | 47 |
| 4.3. Choix des critères d'analyse et justification..... | 48 |
| 4.4. Évaluation et pondération des critères..... | 49 |
| 4.5. Analyse et interprétation des résultats..... | 51 |
| 5. APPLICATION DE LA GRILLE D'ANALYSE MULTICRITÈRE | 52 |
| 5.1. Exemple 1 : Liaison Paris – Toulouse..... | 52 |
| 5.2. Exemple 2 : Liaison Paris – Nice | 53 |
| 5.3. Exemple 3 : Liaison Paris – Marseille..... | 55 |
| 5.4. Exemple 4 : Liaison Montréal - Québec..... | 57 |
| 5.5. Exemple 5 : Liaison Montréal – Boston..... | 58 |
| 5.6. Exemple 6 : Liaison Montréal – Toronto | 60 |
| 5.7. Comparaison des résultats de l'analyse multicritère des liaisons étudiées..... | 61 |
| 6. LIMITES ET RECOMMANDATIONS POUR L'OUTIL | 63 |
| CONCLUSION | 65 |
| RÉFÉRENCES..... | 67 |
| ANNEXE A – DÉTAILS DES CALCULS POUR L'EXEMPLE 1 : LIAISON PARIS – TOULOUSE .. | 78 |

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Figure 1.1 : Évolution des émissions de CO ₂ par secteur depuis 1990 pour les pays de l'OCDE (haut) et les pays n'appartenant pas à l'OCDE (bas) | 8 |
| Figure 1.2 : Évolution de la demande par mode de transport exprimée en milliard de passager-kilomètre . | 9 |
| Figure 1.3 : Émissions mondiales de CO ₂ liées au déplacements nationaux non-urbains selon différents scénarios, exprimées en millions de tonnes..... | 9 |
| Figure 1.4 : Trafic mondial de passager en milliards de passager-kilomètres..... | 10 |
| Figure 1.5 : Émissions de CO ₂ du trafic international selon les scénarios, en million de tonnes de CO ₂ et sans prise en compte de CORSIA | 11 |
| Figure 2.1 : Émissions de GES en kilogramme de CO ₂ e par passager pour différents modes de transport en France..... | 18 |
| Figure 2.2 : Émissions de GES en kilogramme de CO ₂ e par passager pour différents modes de transport aux États-Unis | 19 |
| Figure 2.3 : Émissions de GES en kilogramme de CO ₂ e par passager pour différents modes de transport au Canada | 20 |
| Figure 2.4 : Émissions de NO _x exprimées en gramme par passager pour différents modes de transport en France | 26 |
| Figure 2.5 : Émissions de CO exprimées en gramme par passager pour différents modes de transport en France..... | 27 |
| Figure 2.6 : Émissions de SO ₂ exprimées en gramme par passager pour différents modes de transport en France | 28 |
| Figure 2.7 : Émissions de NO _x exprimées en gramme par passager pour différents modes de transport au Canada et aux États-Unis | 29 |
| Figure 2.8 : Émissions de CO exprimées en gramme par passager pour différents modes de transport au Canada et aux États-Unis | 30 |
| Figure 2.9 : Émissions de SO ₂ exprimées en gramme par passager pour différents modes de transport au Canada et aux États-Unis..... | 31 |
| Figure 3.1 : Évolution du prix moyen du trajet en fonction de la distance parcourue et du mode de transport utilisé, pour des déplacements en France | 38 |

| | |
|--|----|
| Figure 3.2 : Évolution du prix moyen du trajet en fonction de la distance parcourue et du mode de transport utilisé, pour des déplacements aux États-Unis..... | 39 |
| Figure 3.3 : Évolution du prix moyen du trajet en fonction de la distance parcourue et du mode de transport utilisé, pour des déplacements au Canada | 40 |
| Tableau 1.1 : Forçage radiatif positif en W/m ² des GES pour l'année 2018..... | 4 |
| Tableau 1.2 : Potentiel de réchauffement global de différents GES sur une période de 100 ans..... | 4 |
| Tableau 1.3 : Correspondance entre les émissions mondiales de GES en 2030 selon différents scénarios et les températures en résultant..... | 6 |
| Tableau 2.1 : Facteurs d'émissions de différents GES selon la partie du vol | 13 |
| Tableau 2.2 : Consommation de kérosène en litre par kilomètre et par passager, segmentée par tranche de distance et par catégorie d'appareil | 14 |
| Tableau 2.3 : Émissions de GES par passager selon la distance et la catégorie d'appareil..... | 14 |
| Tableau 2.4 : Coefficients d'émission pour les trains alimentés au diesel ou à l'électricité | 14 |
| Tableau 2.5 : Émissions de GES par passager par kilomètre en France selon le type de train | 15 |
| Tableau 2.6 : Émissions de GES par passager par kilomètre au Canada selon le type de train | 15 |
| Tableau 2.7 : Facteurs d'émission de GES pour le transport interurbain par rail aux États-Unis..... | 16 |
| Tableau 2.8 : Coefficients d'émission pour les autocars alimentés au diesel..... | 16 |
| Tableau 2.9 : Émissions de GES par passager par kilomètre selon en fonction du pays | 16 |
| Tableau 2.10 : Coefficients d'émission selon le type de véhicule et le GES | 17 |
| Tableau 2.11 : Émissions de GES par passager par kilomètre selon le véhicule et le pays | 17 |
| Tableau 2.12 : Émissions de GES en kilogramme de CO ₂ e par passager pour différents modes de transport sur différentes distances effectuées en France | 18 |
| Tableau 2.13 : Émissions de GES en kilogramme de CO ₂ e par passager pour différents modes de transport sur différentes distances effectuées aux États-Unis | 19 |
| Tableau 2.14 : Émissions de GES en kilogramme de CO ₂ e par passager pour différents modes de transport sur différentes distances effectuées au Canada | 20 |
| Tableau 2.15 : Facteurs d'émission de plusieurs polluants atmosphériques | 22 |

| | |
|--|----|
| Tableau 2.16 : Émissions de polluants atmosphériques par passager selon la distance et la catégorie d'appareil..... | 22 |
| Tableau 2.17 : Coefficients d'émission de polluants atmosphériques les trains alimentés au diesel..... | 23 |
| Tableau 2.18 : Quantité de polluants atmosphériques émis par passager et par kilomètre par un train alimenté au diesel en fonction du pays de circulation..... | 23 |
| Tableau 2.19 : Quantité de polluants atmosphériques émis par passager et par kilomètre par un autocar..... | 24 |
| Tableau 2.20 : Quantité de polluants atmosphériques émis par passager et par kilomètre en fonction du type d'automobile en France | 24 |
| Tableau 2.21 : Émissions de SO ₂ associé à un véhicule léger en Amérique du Nord | 25 |
| Tableau 2.22 : Quantité de polluants atmosphériques émis par un véhicule léger par passager et par kilomètre aux États-Unis et au Canada | 25 |
| Tableau 2.23 : Quantité de polluants atmosphériques émis par différents modes de transport selon la distance parcourue en France | 25 |
| Tableau 2.24 : Quantité de polluants atmosphériques émis par différents modes de transport selon la distance parcourue au Canada et aux États-Unis..... | 28 |
| Tableau 3.1 : Prix moyen du trajet en avion en fonction de la distance parcourue en France | 33 |
| Tableau 3.2 : Prix moyen du trajet en avion en fonction de la distance parcourue aux États-Unis | 33 |
| Tableau 3.3 : Prix moyen du trajet en avion en fonction de la distance parcourue au Canada | 34 |
| Tableau 3.4 : Prix de base du trajet en train en fonction de la distance parcourue en France | 34 |
| Tableau 3.5 : Prix moyen du trajet en train en fonction de la distance parcourue aux États-Unis | 35 |
| Tableau 3.6 : Prix moyen du trajet en train en fonction de la distance parcourue au Canada..... | 35 |
| Tableau 3.7 : Prix moyen du trajet en autocar en fonction de la distance parcourue en France..... | 35 |
| Tableau 3.8 : Prix moyen du trajet en autocar en fonction de la distance parcourue aux États-Unis..... | 36 |
| Tableau 3.9 : Prix moyen du trajet en autocar en fonction de la distance parcourue au Canada | 36 |
| Tableau 3.10 : Prix moyen du trajet en voiture de location selon la distance parcourue en France..... | 37 |
| Tableau 3.11 : Prix moyen du trajet en voiture louée selon la distance parcourue aux États-Unis..... | 37 |
| Tableau 3.12 : Prix moyen du trajet en voiture louée selon la distance parcourue au Canada..... | 38 |

| | |
|--|----|
| Tableau 3.13 : Écart en pourcentage entre les revenus annuels moyens des différents modes de transport et le revenu annuel moyen national..... | 43 |
| Tableau 3.14 : VOT pour des trajets effectués en France selon la distance et le mode de transport..... | 44 |
| Tableau 3.15 : VOT pour des trajets effectués aux États-Unis ou au Canada selon le mode de transport.. | 45 |
| Tableau 4.1 : Coefficients d'émission pour chaque polluant par pays en fonction du mode de transport .. | 47 |
| Tableau 4.2 : Définition des critères | 48 |
| Tableau 4.3 : Pondération et évaluation des critères | 50 |
| Tableau 4.4 : Cas de figures possibles et interprétations en découlant | 51 |
| Tableau 5.1 : Temps des trajets pour les quatre modes de transport en minutes..... | 52 |
| Tableau 5.2 : Résultats de l'application de la grille d'analyse pour la liaison Paris - Toulouse | 52 |
| Tableau 5.3 : Temps des trajets pour les quatre modes de transport en minutes..... | 55 |
| Tableau 5.4 : Résultats de l'application de la grille d'analyse pour la liaison Paris - Nice | 55 |
| Tableau 5.5 : Temps des trajets pour les quatre modes de transport en minutes..... | 56 |
| Tableau 5.6 : Résultats de l'application de la grille d'analyse pour la liaison Paris - Marseille | 56 |
| Tableau 5.7 : Temps des trajets pour les quatre modes de transport en minutes..... | 58 |
| Tableau 5.8 : Résultats de l'application de la grille d'analyse pour la liaison Montréal - Québec | 58 |
| Tableau 5.9 : Temps des trajets pour les quatre modes de transport en minutes..... | 60 |
| Tableau 5.10 : Résultats de l'application de la grille d'analyse pour la liaison Montréal - Boston | 60 |
| Tableau 5.11 : Temps des trajets pour les quatre modes de transport en minutes..... | 61 |
| Tableau 5.12 : Résultats de l'application de la grille d'analyse pour la liaison Montréal - Toronto..... | 61 |

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

| | |
|--------------------------------|--|
| ACFC | Association des chemins du fer du Canada |
| ADEME | Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie |
| ANFA | Association Nationale pour la Formation Automobile |
| ATAG | <i>Air Transport Action Group</i> |
| BTS | <i>Bureau of Transportation Statistics</i> |
| CDN | Contributions déterminées au niveau national |
| CH ₄ | Méthane |
| CITEPA | Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique |
| CO | Monoxyde de carbone |
| CO ₂ | Dioxyde de carbone |
| CORSIA | Régime de compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale |
| DGAC | Direction générale de l'Aviation civile |
| DOT | <i>U.S. Department of Transportation</i> |
| EPA | <i>United States Environmental Protection Agency</i> |
| GES | Gaz à effet de serre |
| GIEC | Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat |
| HFC | Hydrofluorocarbures |
| HNO ₃ | Acide nitrique |
| H ₂ SO ₄ | Acide sulfurique |
| IATA | <i>International Air Transport Association</i> |
| IEA | <i>International Energy Agency</i> |
| INSEE | Institut national de la statistique et des études économiques |
| IPCC | <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> |
| ITF | <i>International Transport Forum</i> |
| MTES | Ministère de la Transition écologique et solidaire |

| | |
|------------------|--|
| NOAA | <i>National Oceanic & Atmospheric Administration</i> |
| NF ₃ | Trifluorure d'azote |
| N ₂ O | Oxyde de diazote |
| NO _x | Oxydes d'azote |
| OACI | Organisation de l'aviation civile internationale |
| OCDE | Organisation de coopération et de développement économiques |
| PFC | Perfluorocarbures |
| PRG | Potentiel de réchauffement global |
| RCP | <i>Representative concentration pathways</i> ; Profils représentatifs d'évolution de concentration |
| SF ₆ | Hexafluorure de soufre |
| SNCF | Société Nationale des Chemins de fer Français |
| SO ₂ | Dioxyde de soufre |
| TGV | Train à grande vitesse |
| UNFCCC | <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> |
| VOT | <i>Value of travel time savings</i> |

INTRODUCTION

Dans son dernier rapport, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) préconise une importante diminution des émissions de gaz à effet de serre (GES), afin de limiter l'élévation globale de la température terrestre à 1,5 °C d'ici 2100 par rapport au début de l'ère industrielle et les changements climatiques qui en découlent. Pour y parvenir, de rapides et profonds changements sont à mener dans tous les secteurs, notamment ceux de l'énergie, de l'industrie et des transports. (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2018) Le transport aérien représente à lui seul plus de 2 % des émissions mondiales de GES. Ces émissions sont en constante augmentation liées à l'intensification du trafic aérien mondial, et en 2020, elles devraient être supérieures de 70 % à celles de 2005. (European Commission, 2016) De plus, les prévisions de croissance de ce secteur à l'horizon 2035 sont de l'ordre de 4 % par an (Organisation de l'aviation civile internationale [OACI], 2018). Pour essayer d'empêcher une augmentation des GES de pair avec cette croissance, l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) explore divers outils, tels que l'utilisation de carburants alternatifs ou encore la mise en place d'un marché carbone dédié au secteur aérien. L'OACI prévoit ainsi d'assurer une croissance neutre en carbone pour le secteur à partir de 2020. (Air Transport Action Group, 2018) Toutefois, ces mesures sont jugées insuffisantes, à la fois par des citoyens, des activistes environnementaux, des scientifiques et des décideurs politiques. Certaines personnes refusent désormais de prendre l'avion lorsqu'une alternative est possible, par préoccupation pour les effets entraînés sur l'environnement (Lasalle, 2019). Au-delà de décisions volontaires, la suppression de certains vols est également avancée par des responsables politiques afin de limiter les changements climatiques. Par exemple, en France, des députés ont proposé un amendement interdisant les vols nationaux jugés remplaçables par des liaisons ferroviaires. (Vaudano et Sénecat, 2019) Rejeté depuis, l'amendement avait été critiqué pour ses conséquences socioéconomiques notamment au regard de la dépendance de l'activité des aéroports régionaux français aux vols nationaux. Par ailleurs, il n'existe pas toujours d'alternatives de mobilité durable à l'utilisation de l'avion. (Fayolle, 2019 ; Le Monde et Agence France-Presse, 2019)

Encourager une mobilité faible émettrice de GES est préconisée pour atténuer les changements climatiques. Cependant, la logique ne doit pas être uniquement comptable afin d'éviter des conséquences socioéconomiques néfastes et le déplacement des émissions des GES sur d'autres moyens de transport. L'objectif général de cet essai consiste donc à déterminer les conditions où l'avion pourrait être remplacé par des alternatives de transport plus durable dans divers contextes géographiques. Pour y parvenir, le premier sous-objectif vise à définir les impacts environnementaux de différents modes de transport en matière d'émissions de GES et de polluants atmosphériques. Le second sous-objectif s'intéresse à la détermination des retombées socioéconomiques de différents secteurs de transport. Le troisième sous-

objectif correspond à la réalisation d'une grille d'analyse multicritère évaluant la pertinence de remplacer l'avion par un autre mode de transport. Le dernier sous-objectif s'applique à la formulation de recommandations pour une utilisation optimale de la grille d'analyse.

Les informations employées dans cet essai proviennent de sources variées. Tout d'abord, la documentation de l'impact des transports dans l'évolution du climat, et plus particulièrement du transport aérien, a été réalisée à partir de rapports du GIEC et de l'*International Transport Forum* (ITF). L'ITF est une organisation intergouvernementale dépendant de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). Les données exploitées concernant les impacts environnementaux et les enjeux économiques et sociaux liés au transport proviennent en majeure partie de rapports ou d'instituts gouvernementaux. Les inventaires nationaux ont par exemple été utilisés pour les émissions de GES et de polluants atmosphériques. Les ressources de l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE), de Statistique Canada, ou encore du *Bureau of Transportation Statistics* (BTS) ont également servi de bases de données principales pour les différents chapitres.

Pour parvenir à répondre à l'objectif principal, cet essai est divisé en six chapitres. Le premier chapitre est consacré à la problématique des changements climatiques actuels et à venir, avec une mise en perspective de l'importance du secteur aérien dans ces derniers. Le second chapitre est ensuite employé afin de déterminer pour les différents modes de transport leurs impacts environnementaux à travers leurs émissions de GES et de polluants atmosphériques. Les enjeux économiques et sociaux de ces mêmes moyens de locomotion sont à la suite parcourus dans le troisième chapitre. Ils sont considérés à travers le coût d'utilisation pour l'usager, les emplois que ces secteurs génèrent et les rémunérations de ces emplois. Les résultats obtenus dans les deux chapitres précédents sont alors mis en commun dans le quatrième par l'intermédiaire de la création de la grille d'analyse multicritère. L'établissement et l'utilisation de cette dernière sont également explicités au cours de ce chapitre. Puis, cette grille est exploitée lors de l'analyse de différentes liaisons aériennes au départ de Paris et de Montréal, pour pouvoir en fonction des résultats, conclure sur leur substituabilité par une autre solution de mobilité. Enfin, le sixième et dernier chapitre est l'opportunité d'énoncer les limites de l'outil précédemment créé et de formuler des recommandations quant à son utilisation et sa possible amélioration.

1. LA PROBLÉMATIQUE DES TRANSPORTS DANS LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les transports et notamment le secteur aérien contribuent à l'évolution du climat et par la même occasion aux changements climatiques.

1.1. L'évolution du climat dans les années à venir

L'effet de serre joue un rôle dans l'équilibre du climat terrestre. Mais des composés perturbent cet équilibre et engendrent une évolution du climat.

1.1.1. L'effet de serre

L'évolution du climat se traduit par le réchauffement du système climatique en raison de l'amplification de l'effet de serre. Ce dernier a lieu dans la troposphère, la plus basse couche de l'atmosphère. Une partie du rayonnement solaire est absorbée par la surface terrestre, l'autre est réfléchie en direction de l'atmosphère. Le rayonnement réémis par la Terre couvre les longueurs d'onde de 5000 nm à 25 000 nm. Il est alors situé dans le domaine de l'infrarouge, beaucoup plus large, qui s'étend de 0,7 μm à 100 μm . Dans la troposphère, des molécules vont retenir une fraction du rayonnement infrarouge réfléchi, ce qui va permettre de contenir la chaleur correspondante sur Terre. Les molécules aptes à absorber des rayons infrarouges contenus dans la plage d'émission de la Terre sont alors appelées « à effet de serre ». Elles possèdent un moment dipolaire, dont les variations selon différents modes de vibration (élongation, compression et cisaillement) fixent leurs niveaux de variation. Ainsi, pour vibrer plus efficacement une molécule ne peut absorber que des photons d'énergie spécifique correspondant à ses niveaux. Ensuite, les molécules à effet de serre convertissent l'énergie infrarouge absorbée sous forme d'énergie cinétique, avant de la libérer sous forme de chaleur lors d'émissions spontanées ou lors de collisions. L'effet de serre est alors un équilibre, qui s'établit à travers des échanges thermiques entre l'atmosphère, la surface terrestre et les océans. Il permet d'assurer une température moyenne terrestre de 15 °C, contre -18 °C en son absence. Ce phénomène est donc nécessaire au fonctionnement de la biosphère. (Olivier, 2017) Mais son intensification engendrée par les activités anthropiques accélère les changements climatiques (Allen et al., 2018).

1.1.2. Les gaz qui participent à l'accentuation de l'effet de serre

Dans le cadre du protocole de Kyoto, les niveaux d'émissions des GES considérés comme concourant le plus à l'effet de serre doivent être surveillés. De plus, les Parties aux économies développées ou en transition vers des économies de marché doivent également limiter voire réduire leurs émissions. Dans cette perspective, l'annexe B du Protocole regroupe les engagements chiffrés que devaient atteindre 39 pays

industrialisés et l'Union européenne. (Institut International du Froid, 2017; United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], 2008) Toutefois, le Protocole a fait l'objet de nombreuses critiques. D'une part, les États-Unis et la Chine qui sont les principaux émetteurs ont refusé d'y adhérer, pour ne pas être concernés par les objectifs de réduction. D'autre part, il est légalement possible pour les pays qui le souhaitent de se retirer de l'accord, afin de ne pas avoir à acheter des crédits compensatoires pour couvrir les émissions en excédent. (Clark, 2012 ; Simon, 2011) Le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde de diazote (N₂O), les perfluorocarbures (PFC), les hydrofluorocarbures (HFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆) sont les six GES ou familles de GES considérés comme concourant le plus à l'effet de serre (UNFCCC, 2008). L'amendement de Doha adopté en 2012 visait à inclure à la liste des GES énoncée précédemment le trifluorure d'azote (NF₃). Cependant, il n'est pas encore entré en vigueur, car uniquement 131 Parties sur les 144 requises l'ont accepté. (UNFCCC, 2012, 2019)

Cinq GES contribuent à eux seuls à 96 % de l'effet de serre, il s'agit du CO₂, du CH₄, du N₂O, du CFC-12 et du CFC-11. Le forçage radiatif de chaque GES, exprimé en watts par mètre carré, est utilisé afin de déterminer leur contribution respective au réchauffement planétaire. (National Oceanic & Atmospheric Administration [NOAA], 2019b) Le tableau 1.1 regroupe les valeurs des forçages radiatifs des cinq principaux GES pour l'année 2018, ainsi que le forçage radiatif positif global résultant.

Tableau 1.1 : Forçage radiatif positif en W/m² des GES pour l'année 2018 (NOAA, 2019b)

| GES | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | CFC-12 | CFC-11 | Autres GES | Total |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|--------|--------|------------|-------|
| Forçage radiatif (W/m ²) | 2,044 | 0,512 | 0,199 | 0,162 | 0,057 | 0,127 | 3,101 |

Le forçage radiatif positif n'est pas le forçage radiatif global terrestre, car des composés possèdent des forçages radiatifs négatifs. Il s'agit par exemple des aérosols (sulfate, nitrate) et des NO_x. Ces substances auront alors pour effet de refroidir l'atmosphère terrestre, en absorbant ou en réfléchissant les rayons solaires incidents. (Mann, 2016; Selin et Mann, 2019)

Ensuite, la notion de potentiel de réchauffement global (PRG) a été développée, afin de comparer les capacités potentielles des GES à contribuer à l'effet de serre, en prenant notamment en compte leur durée de vie respective. Ainsi, les PRG expriment pour un kilogramme de GES émis, à combien de kilogrammes de CO₂ relâché l'effet engendré correspond sur une durée de 100 ans. (GIEC, 2013 ; Olivier, 2017) Le tableau 1.2 présente les PRG des 5 principaux GES et du SF₆.

Tableau 1.2 : Potentiel de réchauffement global de différents GES sur une période de 100 ans (Solomon et al., 2007)

| GES | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | CFC-12 | CFC-11 | SF ₆ |
|-----|-----------------|-----------------|------------------|--------|--------|-----------------|
| PRG | 1 | 25 | 298 | 10 900 | 4 750 | 22 800 |

Les émissions de GES ont augmenté sur la période 1970-2017, passant de 24,3 GtCO₂e à 53,5 GtCO₂e (Janssens-Maenhout et al., 2017; United Nations Environment Programme, 2018). Cet accroissement est en majorité lié aux émissions anthropiques de CO₂, en constante augmentation depuis 1970 et qui atteignent en 2017 la valeur record de 37,1 Gt (Muntean et al., 2018). Cette accentuation des émissions a pour conséquence la progression de la quantité de CO₂ atmosphérique sur la même période (NOAA, 2019b). Cette dernière s'élevait à 410,45 ppm en juin 2019 (NOAA, 2019c). Il en est de même pour le CH₄ et le N₂O, dont les quantités respectives dans l'atmosphère étaient de 1862,8 ppb et 332,28 ppb en mai 2019 (NOAA, 2019a, 2019d). Ces augmentations renforcent les changements climatiques et participent ainsi à l'évolution du climat (IPCC, 2014, 2018).

1.1.3. Les conséquences attendues de l'accentuation de l'effet de serre sur le climat

De manière à prévoir l'évolution possible du climat dans le futur, et notamment l'élévation des températures en découlant, des scénarios explorent diverses hypothèses de réduction des émissions de GES. Dans cette perspective, l'efficacité de différentes stratégies d'atténuation des changements climatiques et de diminution des émissions est évaluée. En outre, des scénarios étudient l'impact des contributions déterminées au niveau national (CDN) par plusieurs pays lors des Accords de Paris sur la limitation des émissions de GES. Ils permettent de souligner que malgré une mise en œuvre totale des CDN non conditionnelles et de celles conditionnelles, l'objectif de contenir le réchauffement climatique en dessous de 1,5°C ou de 2°C en 2100 ne serait pas atteint. (United Nations Environment Programme, 2018) Au tableau 1.3 sont regroupées pour les multiples scénarios les émissions mondiales de GES correspondantes. De plus, cette information est accompagnée des températures estimées y correspondant ou de l'écart entre les objectifs de réduction fixés par les États et les réductions réellement requises.

Tableau 1.3 : Correspondance entre les émissions mondiales de GES en 2030 selon différents scénarios et les températures en résultant (tiré de : United Nations Environment Programme, 2018)

| Scénario (arrondi à la Gt la plus proche) | Nombre de scénarios envisagés | Total des émissions mondiales en 2030 (GtCO ₂ e) | Températures estimées | | | Écart entre les besoins et les perspectives en matière de réduction des émissions en 2030 (GtCO ₂ e) | | |
|---|--|---|---|---|---|--|------------------------|--------------------------------|
| | | | 50 % de probabilité | 66 % de probabilité | 90 % de probabilité | En deçà de 2°C | En deçà de 1,8°C | En deçà de 1,5°C en 2100 |
| Scénario de référence | 179 | 65 (60-70) | | | | | | |
| Profil d'évolution actuel | 4 | 59 (56-60) | | | | 18 (16-20) | 24 (22-25) | 35 (32-36) |
| CDN non conditionnelles | 12 | 56 (52-58) | | | | 15 (12-17) | 21 (17-23) | 32 (28-34) |
| CDN conditionnelles | 10 | 53 (49-55) | | | | 13 (9-15) | 19 (15-20) | 29 (26-31) |
| En deçà de 2°C (66 % de probabilité) | 29 | 40 (38-45) | Plafond: 1,7–1,8°C En 2100: 1,6–1,7°C | Plafond : 1,9–2,0°C En 2100: 1,8–1,9°C | Plafond : 2,4–2,6°C En 2100: 2,3–2,5°C | | | |
| En deçà de 1,8°C (66 % de probabilité) | 43 | 34 (30-40) | Plafond : 1,6–1,7°C En 2100: 1,3–1,6°C | Plafond : 1,7–1,8°C En 2100: 1,5–1,7°C | Plafond : 2,1–2,3°C En 2100: 1,9–2,2°C | | | |
| En deçà de 1,5°C en 2100 (66 % de probabilité) | 13 | 24 (22-30) | Plafond : 1,5–1,6°C En 2100: 1,2–1,3°C | Plafond : 1,6–1,7°C En 2100: 1,4–1,5°C | Plafond : 2,0–2,1°C En 2100: 1,8–1,9°C | | | |

En 2018, le GIEC a publié un rapport spécial concernant l'évolution du climat. Ce dernier portait sur l'importance de limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C et les manières d'y parvenir. L'augmentation de la température de 1,5 °C a été choisie pour deux raisons. D'une part, elle correspond à la limite énoncée dans l'Accord de Paris, et d'autre part elle implique des changements climatiques qui représentent déjà des risques élevés pour les populations et la biosphère et requièrent des mesures d'adaptation majeures. Afin d'aller dans ce sens, le GIEC préconise une importante diminution des émissions de GES, ainsi que de rapides et profonds changements dans tous les secteurs, notamment ceux de l'énergie, de l'industrie et des transports. En effet, les activités humaines ont d'ores et déjà induit un accroissement de la température de 1°C par rapport à la période préindustrielle et au rythme actuel du réchauffement, les 1,5°C devraient être atteints d'ici 20 ans. En termes numériques, le GIEC estime que pour avoir une probabilité de 66 % de limiter l'augmentation de température à 1,5°C, le budget carbone restant s'élève à 420 GtCO₂. (IPCC, 2018)

1.2. Portrait global des transports et contribution aux émissions de GES

En 2016, le secteur des transports a généré 7,0 Gt de CO₂e, en excluant le transport international, contributeur à hauteur de 1 Gt de CO₂e aux émissions mondiales. Avec ces résultats, le transport arrive en troisième position des secteurs économiques les plus émetteurs de GES, comptant pour 14 % des émissions globales de GES. Le transport international représente 2 % de ces émissions. (United Nations Climate Change Secretariat, 2019) Depuis 2014, les émissions de GES liées au transport international connaissent une augmentation annuelle de 2 %, s'établissant en 2017 à 1,27 Gt de CO₂e (Olivier et Peters, 2018 ; United Nations Environment Programme, 2018). Cependant, les données disponibles concernant les émissions de GES de l'ensemble du secteur des transports se concentrent majoritairement sur le CO₂, principal GES émis. Ainsi, pour des raisons d'accessibilité des données, la contribution des transports aux émissions de GES sera basée sur leurs émissions de CO₂ dans la suite cette sous-section.

En 2016, 7,87 Gt de CO₂ ont été émis par le secteur des transports (International Energy Agency [IEA], 2019b). Depuis 1990, les émissions de CO₂ de ce secteur enregistrent une augmentation plus forte que les émissions de CO₂ imputables aux secteurs de l'industrie et de l'énergie (International Transport Forum [ITF], 2019). La figure 1.1 montre l'évolution des émissions de CO₂ par secteur, en prenant comme année de référence 1990. Il est ainsi possible de constater qu'au cours des dernières années le secteur des transports est le seul dont les émissions ont continué de croître. De plus, les engagements de réduction des émissions pris par les différents pays signataires de l'Accord de Paris sont jugés insuffisants. En effet, même si la plupart évoquent la nécessité de décarboniser les transports, seulement 10 % d'entre eux comportent des objectifs chiffrés de réduction pour ce secteur. (Felix, 2018 ; ITF, 2019)

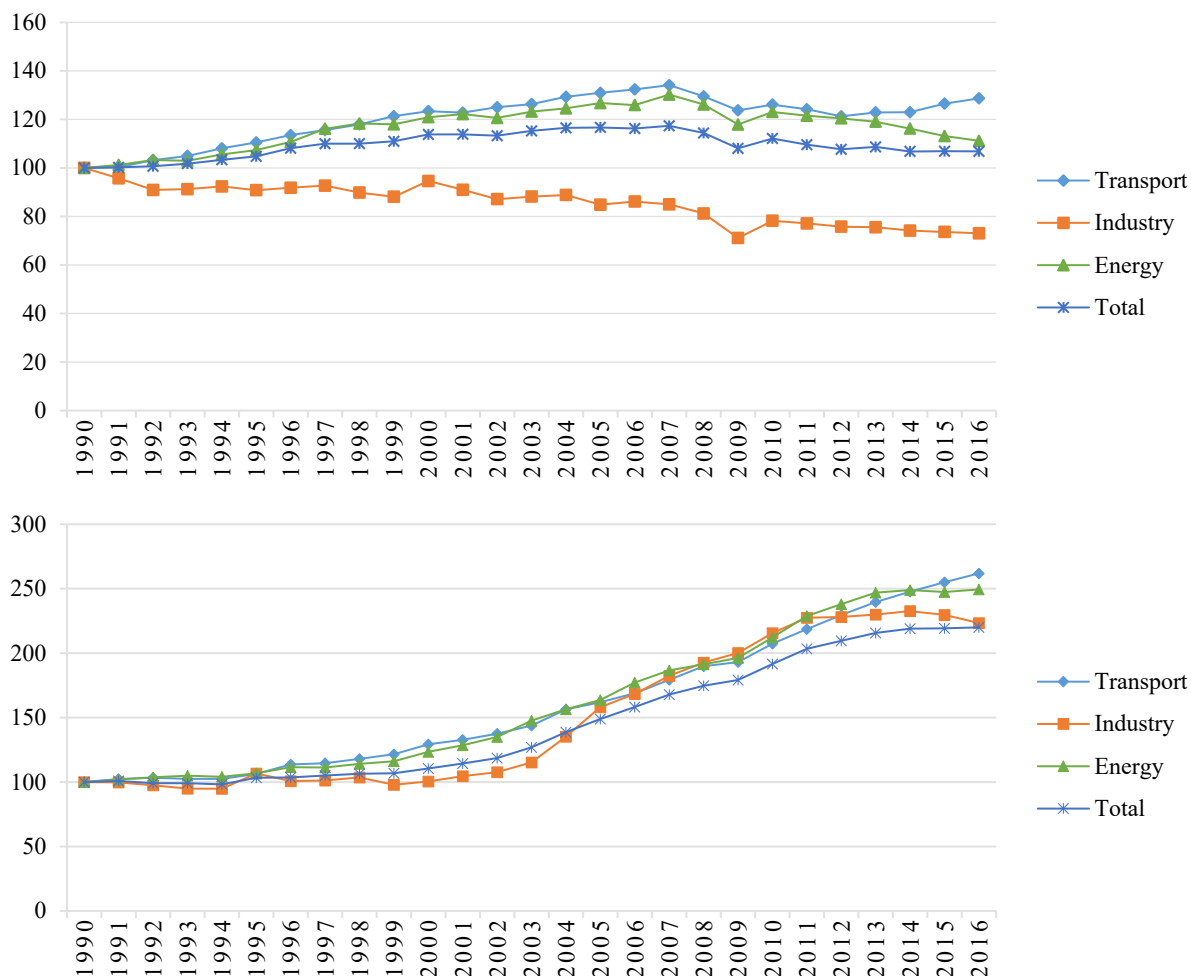


Figure 1.1 : Évolution des émissions de CO₂ par secteur depuis 1990 pour les pays de l'OCDE (haut) et les pays n'appartenant pas à l'OCDE (bas) (adapté de : IEA, 2019a)

À cela s'ajoute la difficulté à faire décroître les émissions qui lui sont associées en raison de deux défis majeurs. Le premier consiste en la dépendance aux énergies fossiles, qui représentent 92 % de l'énergie utilisée. Le deuxième repose sur la demande croissante de transport, notamment en matière de passager. Ainsi, le nombre de passagers-kilomètres devrait tripler d'ici la moitié du siècle, passant de 44 billions en 2015 à 122 billions en 2050. (ITF, 2019) La figure 1.2 décrit l'augmentation attendue de la demande pour différents modes de transport. Le transport non urbain signifie le transport régional qui permet de relier deux agglomérations distinctes ou se déplacer à l'intérieur d'une région. Il exclut donc le transport international et le transport en agglomération. Le transport par route hors agglomération sera en 2050 le mode de mobilité générant le plus de déplacement de passager, avec 47 billions de passagers-kilomètres. (ITF, 2019)

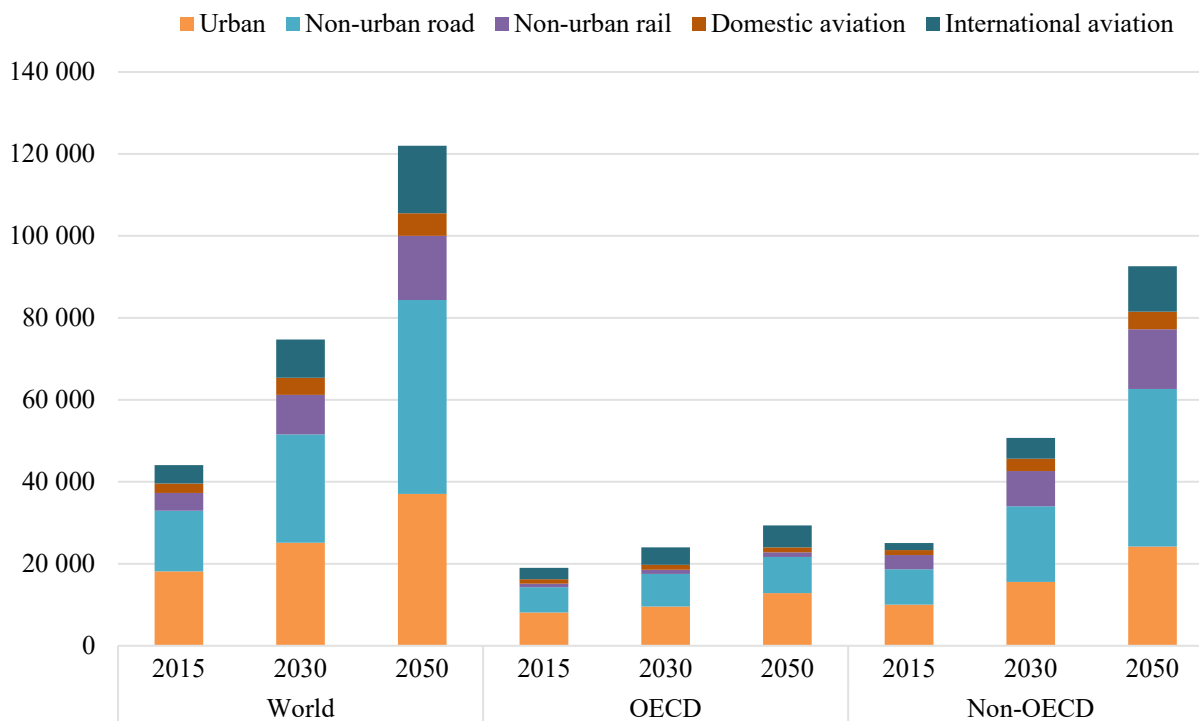


Figure 1.2 : Évolution de la demande par mode de transport exprimée en milliard de passager-kilomètre (adapté de : ITF, 2019)

Le transport non urbain énoncé précédemment englobe les déplacements effectués en voiture individuelle, en bus, en train et en avion. Avec l'application des mesures d'atténuation attenantes aux engagements évoqués antérieurement, l'augmentation de ces déplacements s'accompagnera d'un accroissement des émissions intérieures de CO₂. Les déplacements en voiture individuelle et en avion en seront les deux principaux vecteurs. (ITF, 2019) La figure 1.3 représente visuellement ces augmentations.

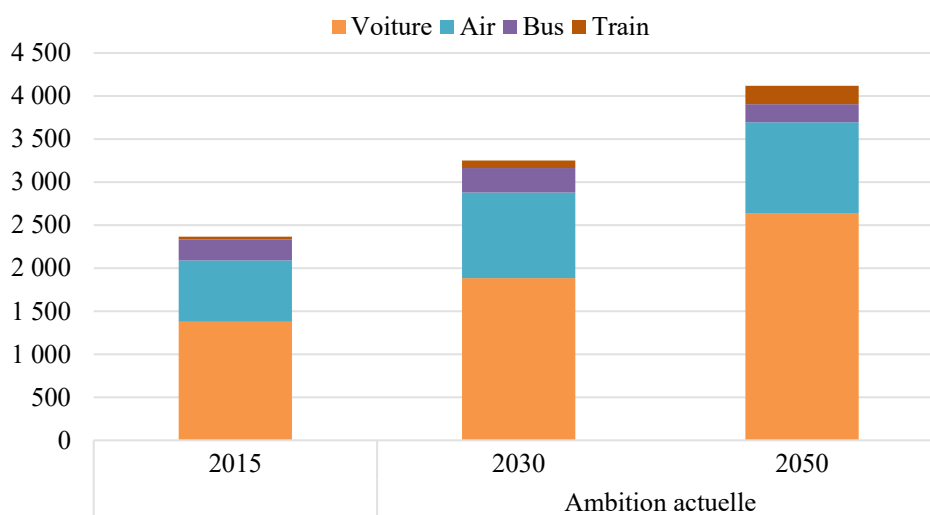


Figure 1.3 : Émissions mondiales de CO₂ liées aux déplacements nationaux non-urbains selon différents scénarios, exprimées en millions de tonnes (adapté de : ITF, 2019)

1.3. Portrait du secteur aérien mondial et contribution aux émissions de GES

En 2017, le secteur aérien mondial a transporté 4,1 milliards de passagers sur l'ensemble des 41,9 millions de vols commerciaux réalisés. Sur le plan économique, le secteur est impliqué dans 65,5 millions d'emplois de manière directe et indirecte et a généré un impact financier de 2 700 milliards de dollars à l'échelle mondiale. (Air Transport Action Group [ATAG], 2018) De plus, l'aviation devrait connaître la plus forte croissance en termes de demande d'ici 2050, avec une progression annuelle de 3,8 %. Cet accroissement passera également par une augmentation du trafic aérien international et domestique, avec notamment dans les quinze prochaines années une multiplication par deux du nombre de vols et de passagers. (ATAG, 2018 ; ITF, 2019) La figure 1.4 illustre cette forte croissance, qui sera majoritairement due à la croissance économique des pays en développement. Et plus particulièrement de la Chine et l'Inde, puisque ces deux nations compteront à elles seules pour un quart du trafic mondial en 2050 (ITF, 2019).

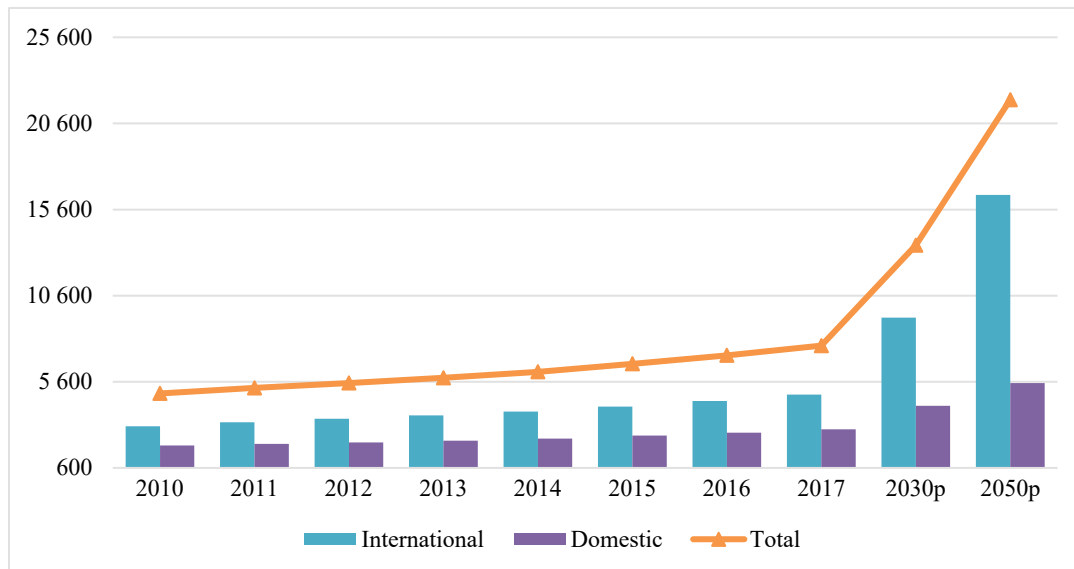


Figure 1.4 : Trafic mondial de passager en milliards de passager-kilomètres (adapté de : ITF, 2019)

Cependant, l'aviation internationale a également un poids environnemental non négligeable. À l'égard des GES, le secteur aérien représente plus de 2 % des émissions mondiales. Ces émissions sont en constante augmentation liées à l'intensification du trafic aérien mondial. Et en 2020, elles devraient être supérieures de 70 % à celles de 2005. (European Commission, 2016) Concernant les émissions de CO₂, en 2017, l'aviation internationale a entraîné l'émission de 543,3 Mt de CO₂, soit une augmentation de 110 % par rapport à 1990 (Muntean, 2018). Par ailleurs, comme illustré à la figure 1.5, les engagements actuels internationaux n'arriveraient pas à enrayer l'intensification continue des émissions de CO₂ avec une hausse de 50 % d'ici 2050. Le scénario en lien avec les engagements actuels internationaux prend en compte une tarification du carbone quasi-statique par rapport aux niveaux actuels et le coût des carburants alternatifs

serait quatre fois supérieurs à celui des carburants traditionnels. Dans le cas de figure d'engagements internationaux forts, le prix du carbone serait fortement augmenté et l'écart de prix entre les carburants alternatifs et traditionnels serait réduit à un facteur multiplicatif de trois. Toutefois les projections avancées par l'OCDE et l'International Transport Forum ne prennent pas en compte la mise en place par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) d'un marché carbone dédié au secteur aérien. (ITF, 2019)

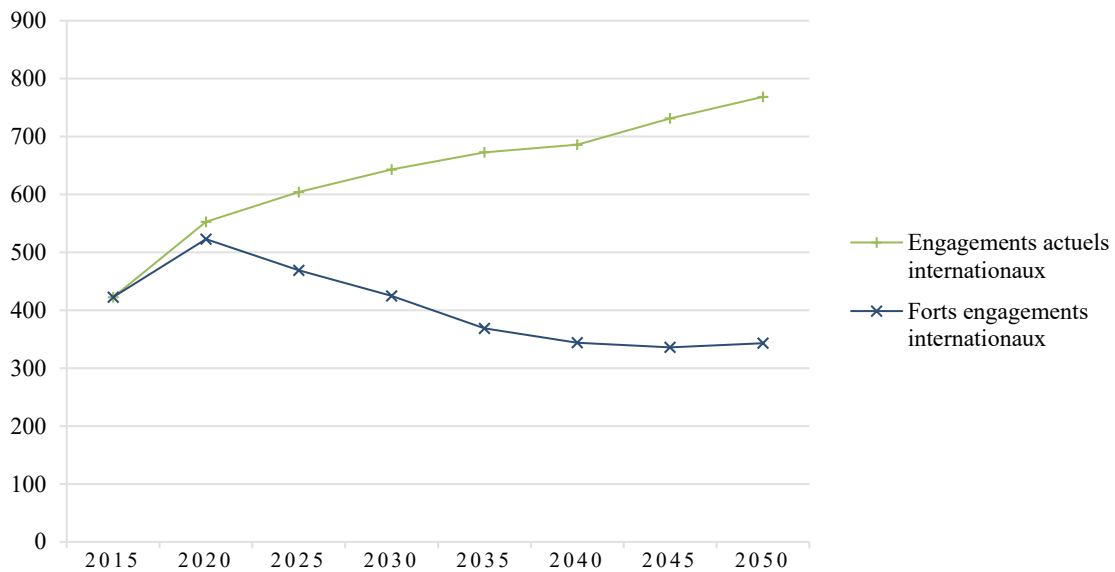


Figure 1.5 : Émissions de CO2 du trafic international selon les scénarios, en million de tonnes de CO2 et sans prise en compte de CORSIA (adapté de : ITF, 2019)

En effet, pour essayer d'empêcher une augmentation des GES de pair avec la croissance du secteur, l'OACI explore divers outils, tels que l'utilisation de carburants alternatifs ou encore la mise en place d'un marché carbone. Elle vise ainsi d'assurer une croissance neutre en carbone pour le secteur à partir de 2020. (ATAG, 2018) Dans cette perspective, le Régime de compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale (CORSIA) servira à compenser les émissions de GES supplémentaires par rapport au niveau de 2020. L'implémentation s'effectuera en plusieurs phases : une phase volontaire de 2021 à 2023 où seuls les vols entre des pays volontaires seront concernés par les obligations de compensation, puis à partir de 2027 la compensation deviendra obligatoire pour tous les vols internationaux, à l'exception de certaines liaisons, notamment à destination des pays les moins développés. En revanche, toutes les compagnies aériennes appartenant à des pays membres de l'OACI doivent depuis 2019 rapporter leurs émissions de GES. (International Air Transport Association [IATA], 2019a, 2019b ; Organisation de l'aviation civile internationale [OACI], 2019a) À travers ce mécanisme, l'OACI prévoit qu'environ 2,5 milliards de tonnes de CO₂ seront compensées entre 2021 et 2035 (OACI, 2019b). Mais cette initiative est critiquée par des organisations de protection de l'environnement, notamment car elle vise à compenser les émissions de GES, plutôt que les réduire réellement (WWF-UK, 2017). De plus, de manière à limiter le réchauffement planétaire, les experts du GIEC suggèrent des changements structurels dans les transports, tel que le transfert des passagers vers les modes de transport les plus efficaces. Ainsi, il serait question de reporter une partie du trafic automobile et aérien sur le trafic ferroviaire et le transport par autocar. (Rogelj et al., 2018) Vis-à-vis du secteur aérien, l'option la plus plausible pour décarboniser ses activités seraient le développement des carburants alternatifs pour les trajets intercontinentaux. Tandis que sur les distances plus courtes, comme par exemple entre deux villes, le passage à d'autre moyen de transport, tel que les trains à grande vitesse est recommandé. (de Coninck et al., 2018)

2. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES DIFFÉRENTS MODES DE TRANSPORT

Les impacts environnementaux des différents modes de transport ont été comparés pour les émissions de GES et la pollution atmosphérique. Les émissions de GES ou de polluants atmosphériques considérées ont été restreintes à la phase d'utilisation des transports. La production, l'acheminement et la fin de vie de ces derniers n'ont alors pas été pris en compte lors de l'analyse. Les quatre modes de transport étudiés sont ceux qui émettent le plus de CO₂ par passager au kilomètre sur des distances nationales en France. Il s'agit de : l'avion, le train, l'autocar et la voiture individuelle. La navigation fluviale a été laissée de côté étant un mode de déplacement marginal. (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie [ADEME], 2018a)

2.1. Analyse comparative des émissions de GES

Dans cette première sous-section, les émissions de GES par kilomètre et par passager ont été déterminées en fonction de la distance parcourue pour différents modes de transport.

2.1.1. L'avion

Les émissions de GES liées au fonctionnement d'un avion dépendent de plusieurs paramètres. Tout d'abord, elles ne sont pas constantes sur l'ensemble du vol, ainsi deux parties sont à considérer pour évaluer les émissions d'un vol. La première est le cycle d'atterrissage et de décollage, qui a lieu à moins de 1 000 m d'altitude et sur une distance d'environ 27 km. La seconde correspond à la portion qui s'effectue à plus de 1 000 m d'altitude et qui est dite de croisière. (Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique [CITEPA], 2019b ; Direction générale de l'Aviation civile [DGAC], 2015) Les facteurs d'émission relatifs au trafic aérien définis par les lignes directrices de la Convention cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques et devant être utilisés pour la réalisation des inventaires nationaux sont présentés au tableau 2.1 (CITEPA, 2019a, 2019b). Ils étaient initialement renseignés en kg/Mg kérosène ou en g/Mg kérosène, ils ont alors été convertis afin d'être plus facilement utilisables en utilisant la masse volumique du kérosène fixée à 800 kg par litre (ADEME, 2018b). Les émissions de CH₄ sont supposées n'intervenir que lors du décollage et de l'atterrissage en accord avec les lignes directrices du GIEC (CITEPA, 2019b).

Tableau 2.1: Facteurs d'émissions de différents GES selon la partie du vol (adapté de : CITEPA, 2019a)

| Facteur d'émission | CO ₂ (kg/L kérosène) | CH ₄ (g/L kérosène) | N ₂ O (g/L kérosène) | CO ₂ e (g/L kérosène) |
|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Cycle d'atterrissage/décollage | 2,52 | 0,184 | 0,0704 | 2 546 |
| Croisière | 2,52 | 0 | 0,0704 | 2 541 |

Ensuite, la consommation de kérosène d'un appareil va dépendre, entre autres, de la distance parcourue et de la catégorie d'appareils, c'est-à-dire sa capacité en nombre de sièges. La consommation de carburant en litre par kilomètre et par passager est renseignée au tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Consommation de kérosène en litre par kilomètre et par passager, segmentée par tranche de distance et par catégorie d'appareil (tiré de : Ministère de la Transition écologique et solidaire [MTES], 2018)

| Distance (km) | 50 à 100 sièges | 101 à 180 sièges | 181 à 250 sièges | Plus de 250 sièges |
|---------------|-----------------|------------------|------------------|--------------------|
| 0 – 1 000 | 0,061 | 0,046 | 0,038 | - |
| 1 000 – 2 000 | 0,052 | 0,038 | 0,031 | 0,04 |
| 2 000 – 3 000 | - | 0,035 | 0,03 | 0,033 |
| 3 000 – 4 000 | - | 0,034 | 0,032 | 0,032 |

Par ailleurs, l'un des objectifs de ce travail étant d'évaluer la pertinence de remplacer l'avion par un autre mode de transport, les résultats obtenus sont comparés sur la base des distances correspondant aux liaisons aériennes les plus fréquentées. Ainsi, en s'appuyant sur les trente liaisons aériennes intérieures les plus fréquentées en France en 2018, l'intervalle kilométrique pertinent apparaît être compris entre 300 et 900 km (DGAC et MTES, 2019b). Dans cette perspective, la quantité de GES émise par un avion a été calculée pour différentes distances de cet intervalle. Les résultats obtenus sont regroupés au tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Émissions de GES par passager selon la distance et la catégorie d'appareil

| Distance (km) | Émissions de GES en kilogramme de CO ₂ e par passager | | |
|---------------|--|------------------|------------------|
| | 50 à 100 sièges | 101 à 180 sièges | 181 à 250 sièges |
| 300 | 47 | 35 | 29 |
| 500 | 78 | 58 | 48 |
| 700 | 109 | 82 | 68 |
| 900 | 140 | 105 | 87 |

Néanmoins, ces émissions sont des approximations qui servent de point de comparaison avec les modes de transport explorés ci-après. Dans la section 5, des liaisons particulières sont étudiées, pour cette raison les calculateurs des émissions carbone de l'OACI et de la DGAC sont utilisés comme référence afin d'avoir des valeurs plus précises (DGAC, 2019; OACI, 2016).

2.1.2. Le train

À l'instar des émissions de GES provoquées par les trajets effectués en avion, des coefficients d'émissions relatifs à la consommation des trains sont utilisés dans les inventaires nationaux. Les facteurs d'émission employés pour le transport ferroviaire sont regroupés au tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Coefficients d'émission pour les trains alimentés au diesel ou à l'électricité (tiré de : Environnement et Changement climatique Canada, 2019b ; MTES, 2018)

| Coefficient d'émission (g/L de diesel) | | | | Coefficient d'émission (g CO ₂ e/kWh) |
|--|-----------------|------------------|-------------------|--|
| CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | CO ₂ e | CO ₂ e |
| 2 681 | 0,15 | 1 | 2 983 | 48 |

En France, trois types de train circulent sur le réseau ferré : les trains à grande vitesse (TGV), les trains grandes lignes et les trains express régionaux. Les deux premières catégories fonctionnent uniquement à l'électricité, tandis que les trains express régionaux tournent à l'électricité ou au diesel selon les modèles. (MTES, 2018) De manière à évaluer la quantité de GES émise par passager par kilomètre, la consommation moyenne de chaque catégorie de train a été multipliée par les coefficients d'émission correspondant. Les valeurs obtenues ont ensuite été divisées par le nombre moyen de passagers transportés afin de les ramener par personne. Le nombre de passagers et la consommation de chaque classe de train provient du guide méthodologique du MTES sur l'information GES des prestations de transport (MTES, 2018). Au tableau 2.5 sont réunies les émissions de CO₂e par passager par kilomètre en France.

Tableau 2.5 : Émissions de GES par passager par kilomètre en France selon le type de train

| Type de train | Nombre moyen de passagers | Consommation | CO ₂ (g/km) | CH ₄ (g/km) | N ₂ O (g/km) | CO ₂ e (g/km) | CO ₂ e (g/passager.km) |
|------------------------|---------------------------|--------------|------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| TGV | 285 | 20 kWh/km | - | - | - | 960 | 3,4 |
| Train grandes lignes | 188 | 20 kWh/km | - | - | - | 960 | 5,1 |
| Train express régional | 80 | 13,5 kWh/km | - | - | - | 648 | 8,1 |
| | 68 | 1,7 L/km | 4 557,7 | 0,26 | 1,7 | 5 071 | 74,6 |

Au Canada, la majorité des trains est alimentée au diesel, de ce fait seule cette catégorie est prise en compte dans la suite de l'essai (Environnement et Changement climatique Canada, 2019b). Ensuite, le nombre de moyen de passagers transporté par train a été établi à partir des informations de l'Association des chemins de fer du Canada (ACFC) concernant la fréquentation des trains interville (Association des chemins de fer du Canada [ACFC], 2018b). La consommation moyenne des trains a été établie sur la base de la consommation de diesel pour le transport de voyageurs combinée avec le nombre de kilomètres parcourus (ACFC, 2018a; Statistique Canada, 2019f). Ces informations ont par la suite permis d'estimer les quantités de GES émis par passager par kilomètre au Canada. Les résultats sont rassemblés au tableau 2.6.

Tableau 2.6 : Émissions de GES par passager par kilomètre au Canada selon le type de train

| Type de train | Nombre moyen de passagers | Consommation | CO ₂ (g/km) | CH ₄ (g/km) | N ₂ O (g/km) | CO ₂ e (g/km) | CO ₂ e (g/passager.km) |
|----------------|---------------------------|--------------|------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Train – Diesel | 126 | 4,0 L/km | 10 849 | 0,6 | 4,0 | 12 070 | 95,8 |

Aux États-Unis, l'Agence de protection de l'environnement est responsable de la réalisation de l'inventaire national de GES (United States Environmental Protection Agency [EPA], 2019). Elle utilise des facteurs d'émission exprimant les émissions de GES en gramme par passager et par mile (EPA, 2018). Ces facteurs sont présentés au tableau 2.7. Ils ont été convertis en gramme par passager et par kilomètre.

Tableau 2.7 : Facteurs d'émission de GES pour le transport interurbain par rail aux États-Unis (tiré de EPA, 2019)

| CO ₂ (g/passager.km) | CH ₄ (g/passager.km) | N ₂ O (g/passager.km) | CO ₂ e (g/passager.km) |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 87,0 | 0,005 | 0,002 | 87,7 |

Ainsi, fonction de la longueur du trajet à effectuer, les estimations de GES par passager peuvent être estimées. À la section 2.1.5, les émissions de GES engendrées par les différents modes de transport sont comparées pour différentes distances.

2.1.3. L'autocar

De même que pour l'avion et le train, des coefficients d'émission sont utilisés dans les inventaires nationaux pour le transport de passager par autocar. Ils sont communiqués au tableau 2.8.

Tableau 2.8 : Coefficients d'émission pour les autocars alimentés au diesel (tiré de : Environnement et Changement climatique Canada, 2019b)

| Coefficient d'émission (g/L de diesel) | | |
|--|-----------------|------------------|
| CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O |
| 2 681 | 0,068 | 0,21 |

Ensuite, en multipliant ces coefficients d'émission par les consommations moyennes des autocars en fonction des différents pays, les émissions de CO₂e par kilomètre ont pu être déterminées. Les consommations proviennent de la base de données GHGenius (S&T Squared Consultants Inc., 2019). Pour exprimer les résultats en g/passager.km, les émissions de CO₂e ont été divisées par le nombre moyen d'occupant d'un autobus. Celui-ci est de 29 personnes pour la France, 22 pour les États-Unis et supposé de 22 pour le Canada. Les valeurs obtenues sont présentées au tableau 2.9 (Arafer, 2019b; Bureau of Transportation Statistics [BTS] et U.S. Department of Transportation [DOT], 2019). Les résultats obtenus sont regroupés au tableau 2.9.

Tableau 2.9 : Émissions de GES par passager par kilomètre selon en fonction du pays

| | Consommation (L/100 km) | Émissions (g/km) | | | | Émissions CO ₂ e (g/passager.km) |
|-------------------|----------------------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|--|
| | | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | CO ₂ e | |
| France | 24,75 | 663,58 | 0,0168 | 0,0520 | 679,49 | 23,4 |
| États-Unis | 51,75 | 1 387,41 | 0,035 2 | 0,1087 | 1 420,68 | 65 |
| Canada | 49,55 | 1 328,49 | 0,0337 | 0,1041 | 1 360,34 | 62 |

Des résultats précédents, il ressort que les émissions de GES par passager par kilomètre sont supérieures aux États-Unis et au Canada pour ce mode de transport, en raison d'un écart significatif concernant la consommation au 100 km.

2.1.4. La location de voiture

Pour la location de voiture, il est supposé que le client réserve un véhicule léger à essence ou à diesel. Les coefficients d'émission attendant à ces deux types de véhicule sont renseignés au tableau 2.10.

Tableau 2.10 : Coefficients d'émission selon le type de véhicule et le GES (tiré de : Environnement et Changement climatique Canada, 2019b)

| Coefficients d'émission (g/L de combustible) | | | | | |
|--|-----------------|------------------|-------------------------|-----------------|------------------|
| Véhicule léger à essence | | | Véhicule léger à diesel | | |
| CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O |
| 2 307 | 0,14 | 0,022 | 2 681 | 0,068 | 0,21 |

Il est alors possible en multipliant les coefficients d'émission par les consommations moyennes des véhicules selon leur localisation géographique de déterminer les émissions pour un kilomètre de chaque GES. Les valeurs des consommation moyennes sont tirées de la base de données GHGenius (S&T Squared Consultants Inc., 2019). Ensuite, en utilisant les potentiels de réchauffement global de N₂O et de CH₄ énoncés au tableau 1.2, les résultats obtenus sont convertis en g CO₂e par kilomètre. Enfin, ce dernier est divisé par le nombre d'occupant transporté par un véhicule, afin d'exprimer le résultat final en g CO₂e par kilomètre par passager. Celui a été pris égal à deux, car il s'agit du taux d'occupation moyen des véhicules européens lors de trajets effectués pour des raisons touristiques (European Environment Agency, 2016). Ainsi les valeurs obtenues pour les trois pays sont présentées au tableau 2.11.

Tableau 2.11 : Émissions de GES par passager par kilomètre selon le véhicule et le pays

| | | Consommation (L/ 100 km) | Émissions (g/km) | | | | Émissions CO ₂ e (g/passager.km) |
|------------|--------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|--|
| | | | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ O | CO ₂ e | |
| France | Véhicule léger à essence | 7,51 | 173,36 | 0,0105 | 0,0017 | 174,11 | 87 |
| | Véhicule léger à diesel | 5,82 | 156,7 | 0,004 | 0,0122 | 159,82 | 80 |
| États-Unis | Véhicule léger à essence | 8,4 | 193,79 | 0,0118 | 0,0018 | 194,63 | 98 |
| | Véhicule léger à diesel | 5,88 | 157,64 | 0,004 | 0,0123 | 161,42 | 91 |
| Canada | Véhicule léger à essence | 8,24 | 190,10 | 0,0115 | 0,0018 | 190,93 | 95 |
| | Véhicule léger à diesel | 5,83 | 156,30 | 0,004 | 0,0122 | 160,05 | 90 |

À partir des résultats obtenus, les émissions de CO₂e peuvent être calculées en fonction de la distance parcourue et du type de véhicule utilisé.

2.1.5. Synthèse des résultats

Dans cette sous-section, les niveaux d'émissions de CO₂e déterminés pour les modes de transport traités précédemment sont mis en commun pour chaque pays.

Tout d'abord, les rejets de CO₂e ont été calculés pour différentes distances effectuées avec les quatre moyens de locomotion considérés. Les données ont ensuite été compilées dans un graphique, de manière à faciliter la comparaison. Afin d'avoir une représentation intelligible, les résultats par pays sont reproduits séparément. Pour commencer, le tableau 2.12 et la figure 2.1 regroupent les résultats pour la France.

Tableau 2.12 : Émissions de GES en kilogramme de CO₂e par passager pour différents modes de transport sur différentes distances effectuées en France

| | Avion | | | Train | | | | Autocar | Véhicule léger | |
|---------------|-----------------|------------------|------------------|-------|----------------|---------|--------|---------|----------------|--------|
| Distance (km) | 50 à 100 sièges | 101 à 180 sièges | 181 à 250 sièges | TGV | Grandes lignes | Express | | | Essence | Diesel |
| | | | | | | Élec. | Diesel | | | |
| 300 | 47 | 35 | 29 | 1 | 2 | 2 | 22 | 7 | 26 | 24 |
| 500 | 78 | 58 | 48 | 2 | 3 | 4 | 37 | 12 | 44 | 40 |
| 700 | 109 | 82 | 68 | 2 | 4 | 6 | 52 | 16 | 61 | 56 |
| 900 | 140 | 105 | 87 | 3 | 5 | 7 | 67 | 21 | 78 | 72 |

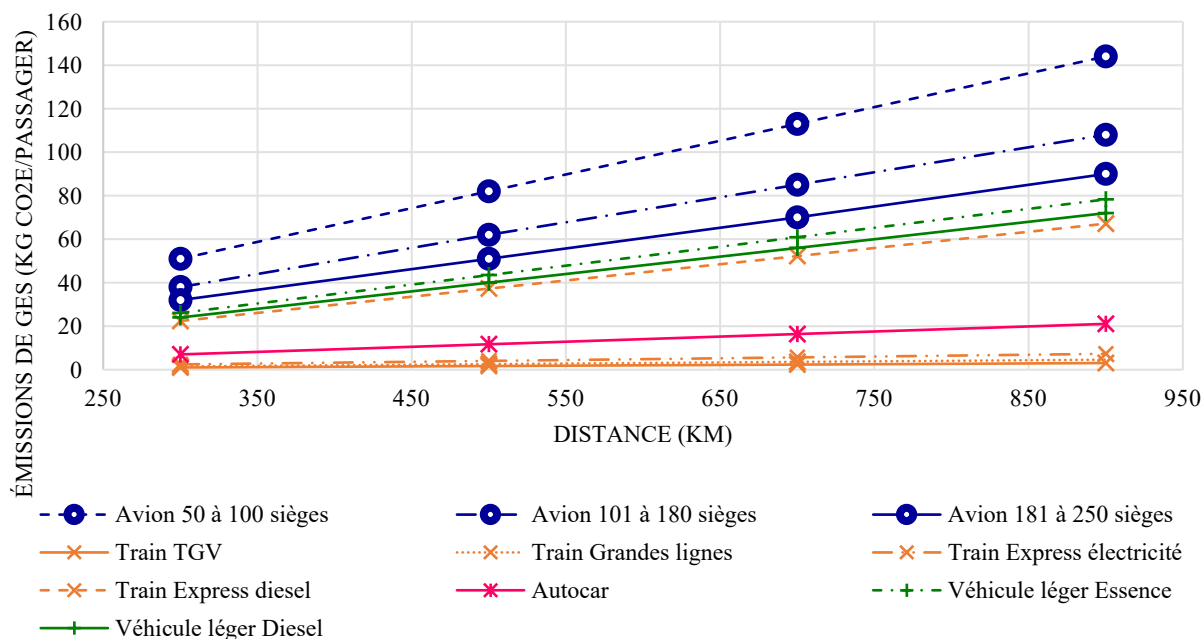


Figure 2.1 : Émissions de GES en kilogramme de CO₂e par passager pour différents modes de transport en France

Le tableau 2.13 et la figure 2.2 regroupent les résultats pour les États-Unis.

Tableau 2.13 : Émissions de GES en kilogramme de CO₂e par passager pour différents modes de transport sur différentes distances effectuées aux États-Unis

| Distance (km) | Avion | | | Train | Autocar | Véhicule léger | |
|---------------|-----------------|------------------|------------------|-------|---------|----------------|--------|
| | 50 à 100 sièges | 101 à 180 sièges | 181 à 250 sièges | | | Essence | Diesel |
| 300 | 47 | 35 | 29 | 26 | 20 | 29 | 27 |
| 500 | 78 | 58 | 48 | 44 | 33 | 49 | 46 |
| 700 | 109 | 82 | 68 | 61 | 46 | 69 | 64 |
| 900 | 140 | 105 | 87 | 79 | 59 | 88 | 82 |

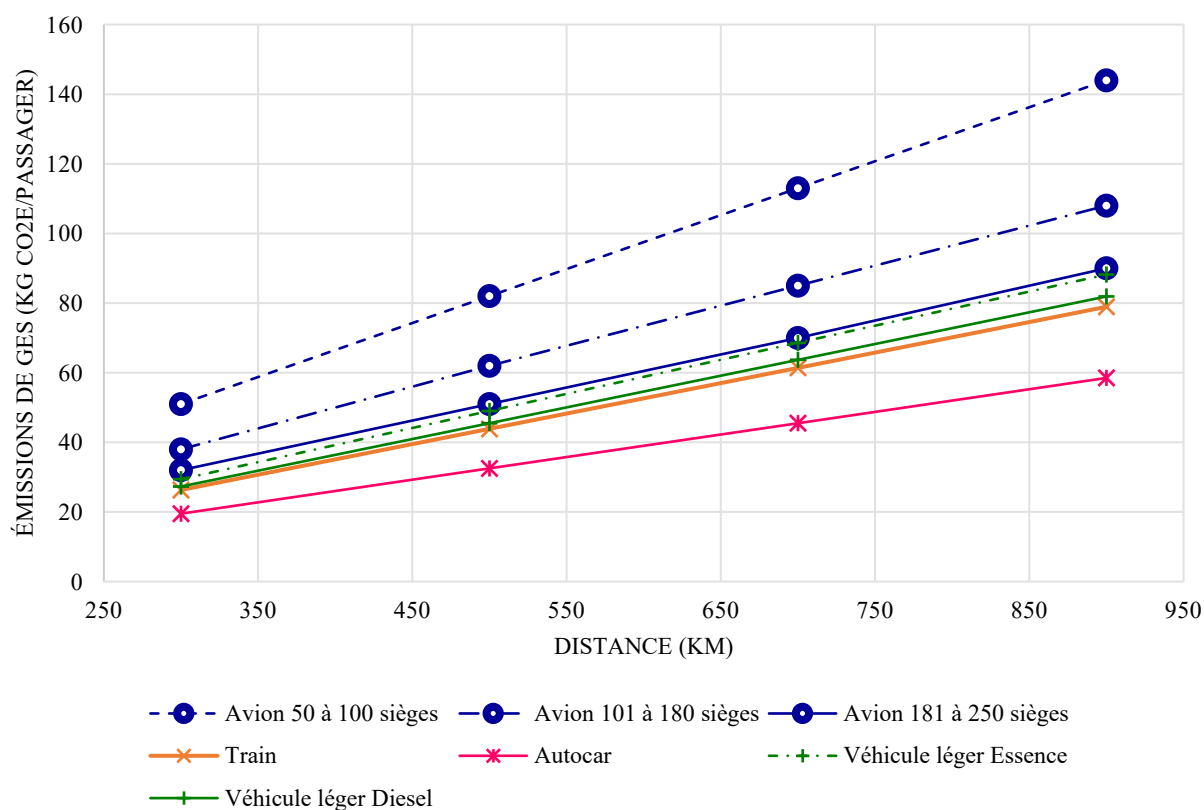


Figure 2.2 : Émissions de GES en kilogramme de CO₂e par passager pour différents modes de transport aux États-Unis

Les résultats relatifs au Canada sont réunis au tableau 2.14 et présentés graphiquement à la figure 2.3.

Tableau 2.14 : Émissions de GES en kilogramme de CO₂e par passager pour différents modes de transport sur différentes distances effectuées au Canada

| Distance | Avion | | | Train | Autocar | Véhicule léger | |
|----------|-----------------|------------------|------------------|-------|---------|----------------|--------|
| | 50 à 100 sièges | 101 à 180 sièges | 181 à 250 sièges | | | Essence | Diesel |
| 300 km | 47 | 35 | 29 | 29 | 19 | 29 | 27 |
| 500 km | 78 | 58 | 48 | 48 | 31 | 48 | 45 |
| 700 km | 109 | 82 | 68 | 67 | 43 | 67 | 63 |
| 900 km | 140 | 105 | 87 | 86 | 56 | 86 | 81 |

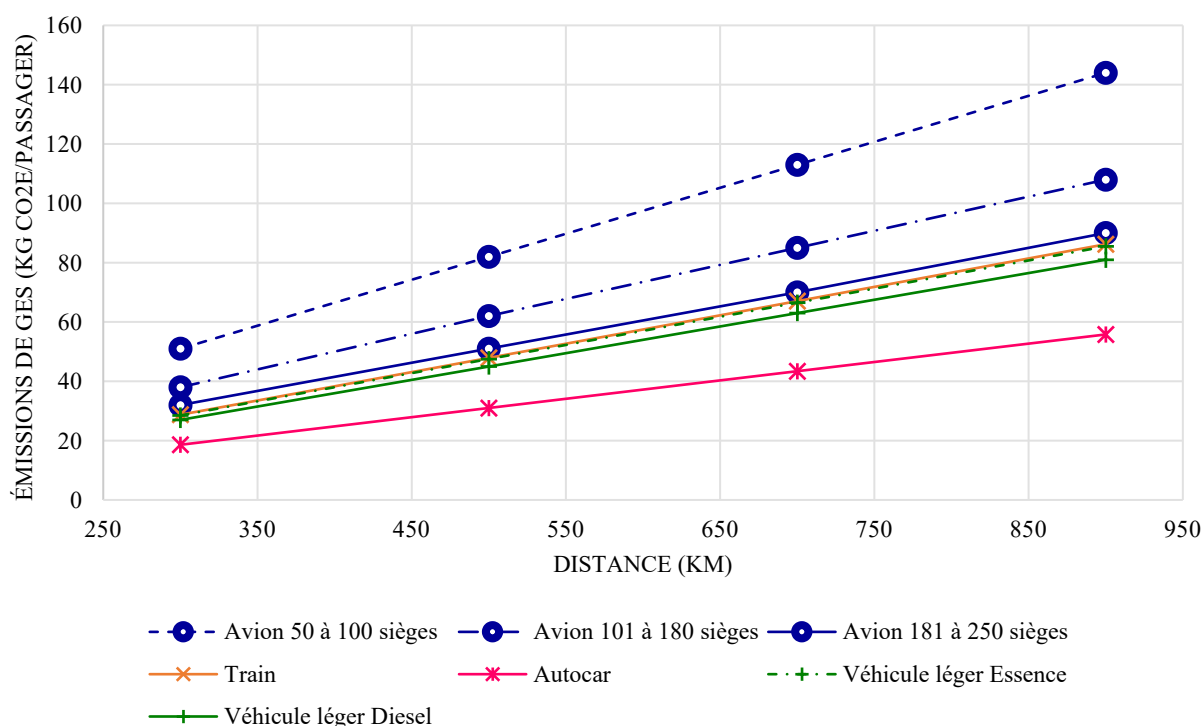


Figure 2.3 : Émissions de GES en kilogramme de CO₂e par passager pour différents modes de transport au Canada

Ce qui précède indique que l’avion est le mode de transport émettant le plus de GES par passager, quelle que soit la distance parcourue. Les véhicules légers sont seconds en ce qui concerne les niveaux d’émission par passager, avec les voitures à essence plus polluantes que celles au diesel. Hormis pour le Canada, où les trains engendrent des émissions de GES par passager plus importantes que les automobiles. Ensuite, en France, les trains express alimentés au diesel émettent plus de GES par passager, que les autocars. Ces derniers génèrent des émissions plus importantes que les trains fonctionnant à l’électricité, c’est-à-dire les TGV, les trains grandes lignes et les trains express pourvus à l’électricité. Enfin, aux États-Unis et au Canada, l’autocar est le moyen de locomotion le moins émetteur.

2.2. Analyse comparative de la pollution atmosphérique

Après avoir comparé les émissions de GES des différents modes de transport lors de leur utilisation, cette sous-section est consacrée à l'étude de la pollution atmosphérique qu'ils engendrent.

2.2.1. Les types de pollution atmosphériques considérées

La pollution atmosphérique représente un danger pour la santé des populations et des écosystèmes qui y sont exposés. Elle se matérialise par des phénomènes divers provoqués et accentués par certains types de substances chimiques. Ces manifestations étant nombreuses, seuls l'ozone troposphérique et l'acidification de l'environnement ont été explorés. Ces derniers ont été choisis, car ce sont les deux manifestations de la pollution atmosphérique auxquelles les transports contribuent le plus dans l'Union européenne. En effet, ils sont responsables de 24 % des émissions des composés chimiques entraînant la formation de l'ozone troposphérique, et de 20 % des rejets de molécules entraînant l'acidification de l'environnement. (European Commission, 2019)

L'ozone troposphérique se caractérise par des concentrations élevées d'ozone localisées à de basses altitudes au niveau de l'air que nous respirons. Sa formation est le résultat de réactions photochimiques entre des composés appelés précurseurs d'ozone, les plus importants sont les oxydes d'azote (NO_x), le monoxyde de carbone (CO), le méthane (CH₄) et les composés organiques volatiles non méthaniques. (Baird, 2008; European Commission, 2019) Les émissions de CH₄ ont déjà été comparées dans la sous-section précédente. Par ailleurs, les polluants atmosphériques dont les émissions ont été traitées sont les NO_x et le CO, car ceux sont les plus impactant (European Commission, 2019).

L'acidification de l'environnement découle de précipitations acides (pluies ou neiges), ainsi que de brouillards acides. Les deux principaux composés des averses sont les acides forts suivants : l'acide sulfurique (H₂SO₄) et l'acide nitrique (HNO₃). Ils sont formés à partir de polluants primaires, respectivement le dioxyde de soufre (SO₂) et le dioxyde d'azote (NO₂). De plus, la manifestation de cette pollution environnementale se matérialise à distance du lieu de formation des polluants. Par exemple, la Suède et la Norvège subissent des précipitations acides entraînées par les activités économiques d'autres pays européens. Il en est de même pour le Québec, dont les lacs et forêts sont affectés par cette pollution transfrontalière. (Baird, 2008; European Commission, 2019; Olivier, 2017) Afin d'étudier au mieux la participation des modes de transport à la pollution atmosphérique, la comparaison des émissions a été menée pour les polluants suivants : NO_x, SO₂ et CO.

2.2.2. La pollution atmosphérique liée à l'aviation civile

À l'instar des émissions de GES, les émissions de polluants atmosphériques évoluent au cours d'un vol. Elles sont plus intenses lors du décollage et de l'atterrissage, que lors de la phase dite de croisière. De même que pour les émissions de GES, des facteurs d'émission sont utilisés dans les inventaires nationaux afin d'établir les niveaux d'émissions de plusieurs substances chimiques. (CITEPA, 2019a, 2019b). Ils étaient initialement renseignés en g/Mg de kérosène, ils ont alors été convertis en g/L de kérosène, afin d'être plus facilement utilisables en utilisant la masse volumique du kérosène fixée à 800 kg par litre (ADEME, 2018b). Ils sont renseignés au tableau 2.15.

Tableau 2.15 : Facteurs d'émission de plusieurs polluants atmosphériques (adapté de : CITEPA, 2019a)

| Facteur d'émission | NOx (g/L kérosène) | CO (g/L kérosène) | SO ₂ (g/L kérosène) |
|--------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------------------|
| Cycle d'atterrissage/décollage | 9 | 9 | 1 |
| Croisière | 5 | 1 | 1 |

En outre, les émissions dépendent également de la distance parcourue et de la catégorie d'appareil. Les consommations de carburant reportées au tableau 2.2 ont servi à calculer les émissions par passager pour différentes distances. Les résultats obtenus se trouvent au tableau 2.16.

Tableau 2.16 : Émissions de polluants atmosphériques par passager selon la distance et la catégorie d'appareil

| Distance | Émissions de polluants (g/passager) | | | | | | | | |
|----------|-------------------------------------|----|-----------------|------------------|----|-----------------|------------------|----|-----------------|
| | 50 à 100 sièges | | | 101 à 180 sièges | | | 181 à 250 sièges | | |
| | NOx | CO | SO ₂ | NOx | CO | SO ₂ | NOx | CO | SO ₂ |
| 300 (km) | 99 | 26 | 15 | 74 | 19 | 11 | 61 | 16 | 9 |
| 500 (km) | 160 | 33 | 24 | 121 | 25 | 18 | 100 | 21 | 15 |
| 700 (km) | 222 | 41 | 34 | 168 | 31 | 26 | 138 | 26 | 21 |
| 900 (km) | 284 | 49 | 44 | 214 | 37 | 33 | 177 | 31 | 27 |

Ensuite, ces résultats ont été exploités à la section 2.2.6 afin de les comparer pour les quatre modes de locomotion.

2.2.3. La pollution atmosphérique liée au transport ferroviaire de voyageurs

Les émissions de polluants atmosphériques associées au transport ferroviaire sont liées aux locomotives fonctionnant au diesel. Puisque les émissions des trains circulant à l'électricité sont considérées comme négligeables. (CITEPA, 2019b) Comme pour les trajets effectués en avion des coefficients d'émissions relatifs à la consommation des trains sont utilisés dans les inventaires nationaux. Par exemple dans le *Rapport d'inventaire des émissions de polluants atmosphériques du Canada 1990–2017*, les émissions du transport ferroviaire ont été estimées sur la base des coefficients élaborés par l'ACFC (ACFC, 2018a;

Environnement et Changement climatique Canada, 2019a). Ces facteurs d'émission employés pour le transport ferroviaire sont regroupés au tableau 2.17.

Tableau 2.17 : Coefficients d'émission de polluants atmosphériques des trains alimentés au diesel (tiré de : Environnement et Changement climatique Canada, 2019a)

| Facteurs d'émission pour les locomotives au diesel (en g/L) | | |
|---|------|-----------------|
| NO _x | CO | SO ₂ |
| 54,05 | 7,03 | 0,02 |

Ces coefficients ont servi à calculer les émissions de polluants par passager par kilomètre, pour les trains alimentés au diesel au Canada, aux États-Unis et en France. Les valeurs sont présentées au tableau 2.18.

Tableau 2.18 : Quantité de polluants atmosphériques émis par passager et par kilomètre par un train alimenté au diesel en fonction du pays de circulation

| Pays | Nombre moyen de passager par train | Consommation (L/km) | Quantité de polluants émis (g/passager.km) | | |
|------------|------------------------------------|---------------------|--|-----|----------------------|
| | | | NO _x | CO | SO ₂ |
| France | 68 | 1,7 | 1,4 | 0,2 | $5,0 \times 10^{-4}$ |
| États-Unis | 172 | 5,3 | 1,7 | 0,2 | $6,0 \times 10^{-4}$ |
| Canada | 126 | 4 | 1,7 | 0,2 | $6,0 \times 10^{-4}$ |

De ce qui précède, il est intéressant de noter que l'efficacité concernant la consommation des trains français est contrebalancée par le faible nombre de passagers des trains au diesel en comparaison avec les trains canadiens ou états-uniens. Il en résulte des données similaires entre les pays. Comme précédemment, les quantités de polluant émis par passager et par kilomètre ont permis la comparaison des divers modes de transport dans la synthèse des résultats à la sous-section 2.2.6.

2.2.4. La pollution atmosphérique liée au transport par autocar

Chaque pays implémente ses propres normes au regard des niveaux d'émission à respecter de la part des véhicules routiers. Ainsi, les autocars sont soumis aux règles en vigueur dans le pays où ils circulent. (The International Council on Clean Transportation, 2015) Néanmoins, les standards actuellement en vigueur aux États-Unis pour les véhicules utilitaires lourds, entre autres les autocars, sont équivalents à la norme Euro VI en usage dans l'Union européenne (Transportpolicy.net, 2018c). De plus, le Canada a restreint ses seuils d'émission autorisés, afin de les faire concorder avec les valeurs états-uniennes (Transportpolicy.net, 2018a). Par conséquent, pour les autocars, les coefficients d'émission employés sont les mêmes pour les trois pays, les différences proviennent du nombre différent de passagers transportés par voyage. Les coefficients d'émission valables pour ce type de véhicule ont été sélectionnés à partir de la base de données de la CITEPA (CITEPA, 2019a). Ils étaient initialement exprimés en milligramme par véhicule et par kilomètre, ils ont alors été divisés par le nombre moyen de passagers transportés, pour être exprimés en milligramme par passager et par kilomètre. Au tableau 2.19 sont réunis les chiffres finaux.

Tableau 2.19 : Quantité de polluants atmosphériques émis par passager et par kilomètre par un autocar (adapté de : CITEPA, 2019a)

| Pays | Nombre moyen de passager par autocar | NO _x (mg/passager.km) | CO (mg/passager.km) | SO ₂ (mg/passager.km) |
|------------|--------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| France | 29 | 3 | 4,7 | 0,1 |
| États-Unis | 22 | 4 | 6,1 | 0,2 |
| Canada | 22 | 4 | 6,1 | 0,2 |

Le rapprochement des différents modes de transport à la section 2.2.6 est en partie basé sur ces résultats.

2.2.5. La pollution atmosphérique liée au déplacement en voiture de location

Comme pour les autocars, la législation en vigueur concernant les émissions de polluants pour les voitures particulières diffère d'un État à un autre. En France, le secteur de la location de voiture de courte durée compte pour environ 10 % des ventes annuelles de véhicule particulier neuf depuis 2014. Ce chiffre représente annuellement 200 000 nouveaux véhicules. (Bardoux, 2019; Frutos, 2018) Pour cette raison, il a été supposé que lors d'une location, un client se verra attribuer une voiture datant d'après 2014, donc conforme à la norme Euro VI (MTES, 2017). Les coefficients d'émission valables pour ce type de véhicule, en fonction de la nature du carburant, étaient exprimés en milligramme par véhicule et par kilomètre (CITEPA, 2019a). Ils ont été convertis en milligramme par véhicule et par passager, par division des valeurs initiales par le taux d'occupation des voitures particulières pour de longues distances. Ce dernier est établi à 2 personnes par véhicule (European Commission, 2016). Les résultats obtenus sont reportés au tableau 2.20.

Tableau 2.20 : Quantité de polluants atmosphériques émis par passager et par kilomètre en fonction du type d'automobile en France (adapté de : CITEPA, 2019a)

| Quantité de polluants émis (mg/passager.km) | | | | | |
|---|-----|-----------------|-------------------------|----|-----------------|
| Véhicule léger à essence | | | Véhicule léger à diesel | | |
| NO _x | CO | SO ₂ | NO _x | CO | SO ₂ |
| 6 | 160 | 0,4 | 222 | 23 | 0,4 |

Les normes canadiennes sur les émissions de polluants atmosphériques sont alignées sur celles des États-Unis, ainsi il est possible de considérer les mêmes coefficients pour les deux pays. Les coefficients pour les rejets de NO_x et de CO étaient exprimés en gramme par miles, ils ont été convertis en milligramme par passager et par kilomètre. (EPA, 2016, 2019) Ne disposant pas des mêmes coefficients pour les émissions de SO₂, ces dernières ont été estimées en posant l'hypothèse que tout le soufre contenu dans le carburant est complètement transformé en SO₂, à partir de la formule suivante : $E_{SO_2} = 2 \times k_s \times FC \times 1000$, où E_{SO_2} représente les émissions de SO₂ en mg/km ; k_s la fraction massique maximale autorisée de soufre dans le carburant en ppm et FC la consommation de carburant en g/km (adapté de : European Environment Agency, 2019).

Le tableau 2.21 regroupe les valeurs numériques des variables employées pour établir les émissions de SO₂ par kilomètre.

Tableau 2.21 : Émissions de SO₂ associé à un véhicule léger en Amérique du Nord

| k_s (en 10⁻⁶g/g_{carburant}) | Consommation moyenne (L/100km) | Densité diesel (g/L) | FC (g_{carburant}/km) | E_{so2} (mg/km) |
|--|---|---------------------------------------|--|--|
| 10 (Transportpolicy.net, 2018b) | 5,86 | 0,845 (ADEME, 2018b) | 49,47 | 0,99 |

Enfin, les quantités de polluants atmosphériques émis par un véhicule léger par passager et par kilomètre en Amérique du Nord sont reportées au tableau 2.22. De même qu'à la section 2.1.4, le nombre de passager moyen par véhicule a été prise égal à deux.

Tableau 2.22 : Quantité de polluants atmosphériques émis par un véhicule léger par passager et par kilomètre aux États-Unis et au Canada

| Quantité de polluants émis (mg/passager.km) | | |
|--|-----------|-----------------------|
| NOx | CO | SO₂ |
| 124 | 1 087 | 0,49 |

Les valeurs des tableaux 2.20 et 2.22 ont permis à la sous-section suivant d'effectuer la comparaison des différents moyens de déplacement vis-à-vis de la pollution atmosphérique.

2.2.6. Synthèse des résultats

Dans cette sous-section, les quantités de polluants atmosphériques évaluées pour les modes de transport traités précédemment sont mis en commun pour chaque pays. Tout d'abord, les rejets de NO_x, CO et SO₂ ont été calculés pour différentes distances effectuées avec les quatre moyens de locomotion considérés. Les données ont ensuite été compilées dans un graphique, de manière à faciliter la comparaison. Afin d'avoir une représentation intelligible, les résultats par polluant et par pays sont reproduits séparément. Pour commencer, le tableau 2.23 regroupe les résultats pour la France et les figures 2.4, 2.5 et 2.7 les illustrent.

Tableau 2.23 : Quantité de polluants atmosphériques émis par différents modes de transport selon la distance parcourue en France

| | Avion | | | Train | Autocar | Véhicule léger | |
|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------|---------|----------------|--------|
| | 50 à 100 sièges | 101 à 180 sièges | 181 à 250 sièges | | | Essence | Diesel |
| Distance (km) | NOx (en g/passager) | | | | | | |
| 300 | 99 | 74 | 61 | 420 | 1 | 2 | 67 |
| 500 | 160 | 121 | 100 | 700 | 2 | 3 | 111 |
| 700 | 222 | 168 | 138 | 980 | 2 | 4 | 155 |
| 900 | 284 | 214 | 177 | 1 260 | 3 | 5 | 200 |

Tableau 2.23 : Quantité de polluants atmosphériques émis par différents modes de transport selon la distance parcourue en France (suite)

| Distance (km) | 50 à 100 sièges | 101 à 180 sièges | 181 à 250 sièges | Train | Autocar | Essence | Diesel |
|---------------|---------------------------------|------------------|------------------|-------|---------|---------|--------|
| | CO (en g/passager) | | | | | | |
| 300 | 26 | 19 | 16 | 60 | 1 | 48 | 7 |
| 500 | 33 | 25 | 21 | 100 | 2 | 80 | 12 |
| 700 | 41 | 31 | 26 | 140 | 3 | 112 | 16 |
| 900 | 49 | 37 | 31 | 180 | 4 | 144 | 21 |
| Distance (km) | SO ₂ (en g/passager) | | | | | | |
| | | | | | | | |
| 300 | 15 | 11 | 9 | 0,2 | 0,0 | 0,1 | 0,1 |
| 500 | 24 | 18 | 15 | 0,3 | 0,1 | 0,2 | 0,2 |
| 700 | 34 | 26 | 21 | 0,4 | 0,1 | 0,3 | 0,3 |
| 900 | 44 | 33 | 27 | 0,5 | 0,1 | 0,4 | 0,4 |

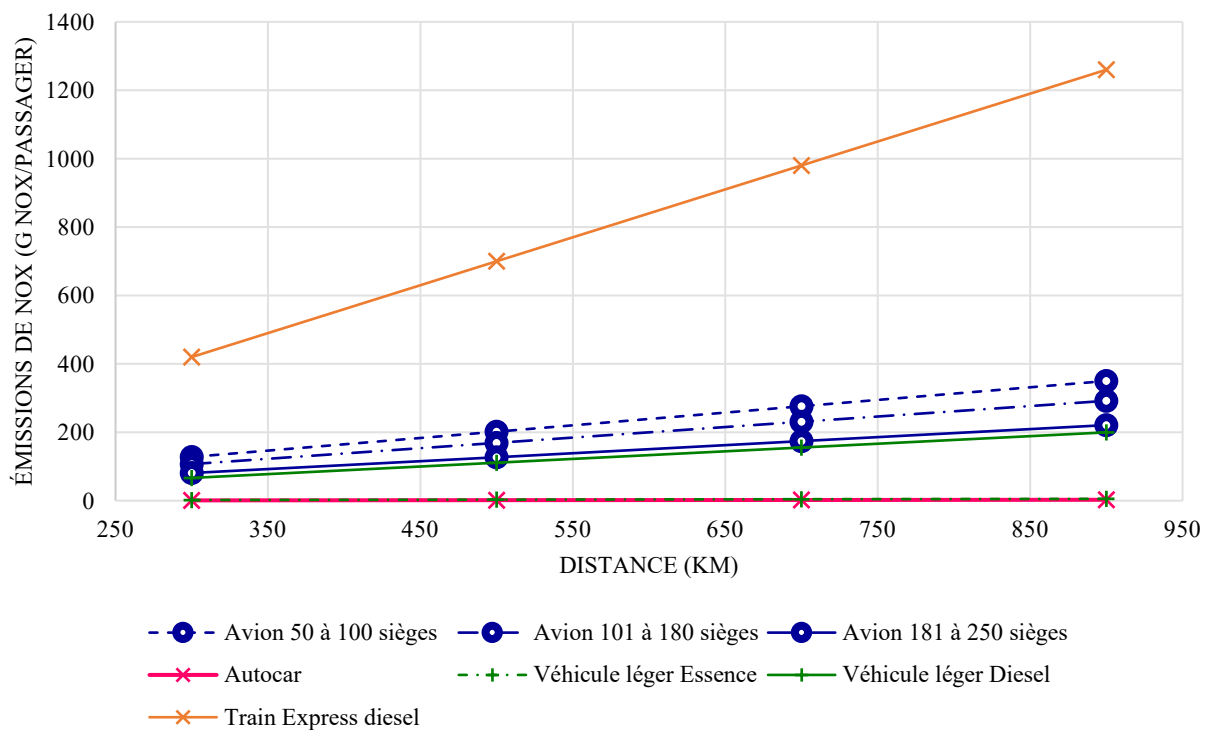


Figure 2.4 : Émissions de NOx exprimées en gramme par passager pour différents modes de transport en France

Les trains fonctionnant au diesel sont le moyen de déplacement émettant le plus de NOx par passager. Le transport aérien est second en matière d'émission de NOx par passager, avec des rejets plus importants pour les avions de petite taille. Les véhicules légers au diesel génèrent des émissions équivalentes à celles d'un avion de 181 à 250 sièges, tandis que les véhicules légers à essence et les autocars ont des émissions anecdotiques en comparaison des autres modes de transport. De plus, il faut rappeler que les TGV, les trains

grandes lignes et express fonctionnant à l'électricité n'apparaissent pas dans le graphique, car leurs émissions sont considérées comme négligeables. Cela est valable également pour les émissions de CO et de SO₂.

De même que la figure 2.4, la figure 2.5 représente les résultats concernant les émissions de CO des modes de transport.

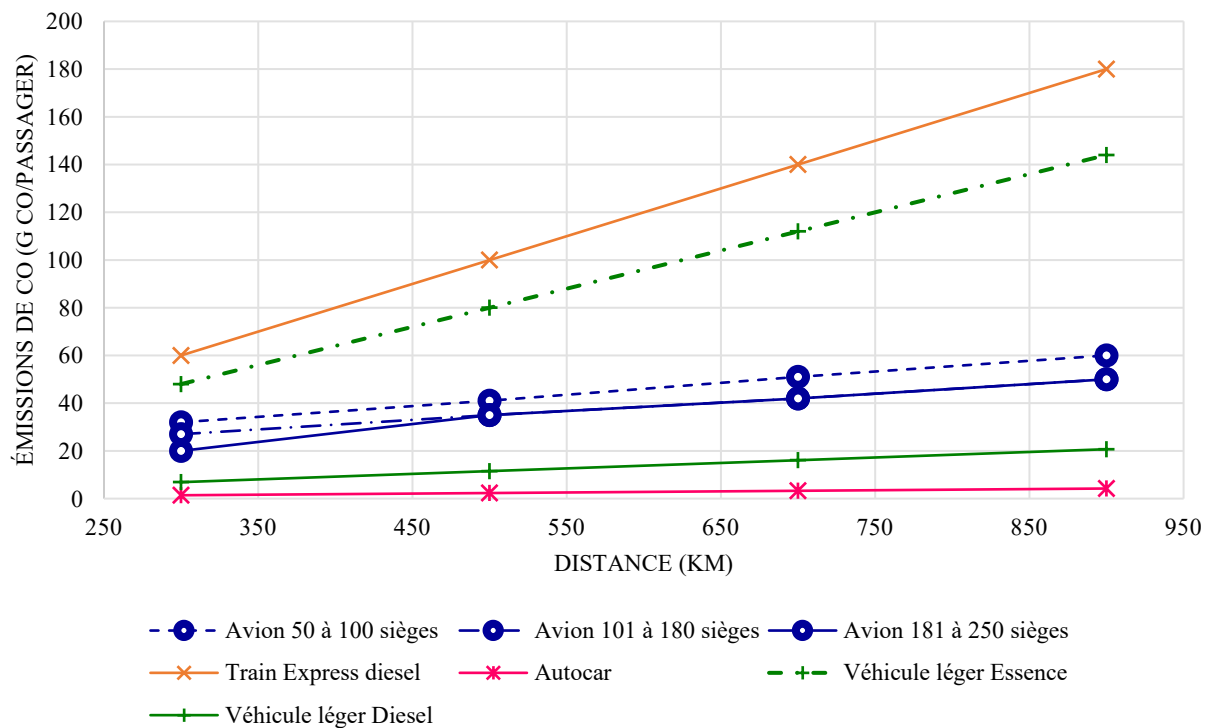


Figure 2.5 : Émissions de CO exprimées en gramme par passager pour différents modes de transport en France

Comme pour les émissions de NO_x, le train express diesel est celui en provoquant le plus concernant le CO. Toutefois, les véhicules légers à essence émettent plus de NO_x par passager que les avions de n'importe quelle catégorie. Ces derniers sont des émetteurs plus importants que les véhicules à diesel et les autocars, une fois les émissions ramenées par passager.

La figure 2.6 met en parallèle les émissions de SO₂ occasionnées par les quatre moyens de locomotion.

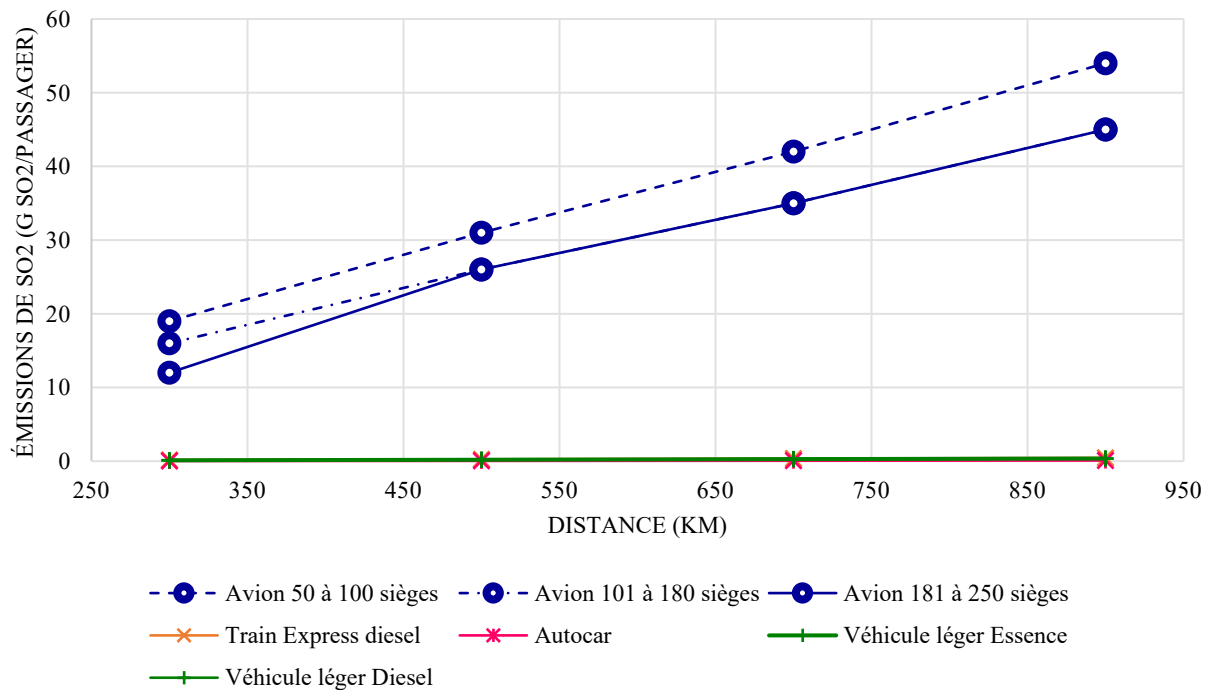


Figure 2.6 : Émissions de SO₂ exprimées en gramme par passager pour différents modes de transport en France

Contrairement aux deux composés précédents, les émissions de SO₂ provoquées par le transport aérien sont bien plus élevées que celles des autres modes de transport. En effet, pour une même distance, elles peuvent être jusqu'à 190 fois plus grandes dans le cas de l'avion.

Ensuite, le tableau 2.24 concentre les résultats pour le Canada et les États-Unis, car ils sont communs pour l'avion, l'autocar et la location de voiture.

Tableau 2.24 : Quantité de polluants atmosphériques émis par différents modes de transport selon la distance parcourue au Canada et aux États-Unis

| | Avion | | | Train | | Autocar | Véhicule léger |
|---------------|---------------------|------------------|------------------|--------|-------|---------|----------------|
| | 50 à 100 sièges | 101 à 180 sièges | 181 à 250 sièges | Canada | É.U. | | |
| Distance (km) | NOx (en g/passager) | | | | | | |
| 300 | 99 | 74 | 61 | 300 | 510 | 1 | 37 |
| 500 | 160 | 121 | 100 | 500 | 850 | 2 | 62 |
| 700 | 222 | 168 | 138 | 700 | 1 190 | 3 | 87 |
| 900 | 284 | 214 | 177 | 900 | 1 530 | 4 | 112 |

Tableau 2.4 : Quantité de polluants atmosphériques émis par différents modes de transport selon la distance parcourue au Canada et aux États-Unis (suite)

| | Avion | | | Train | | Autocar | Véhicule léger |
|---------------|---------------------------------|------------------|------------------|--------|------|---------|----------------|
| | 50 à 100 sièges | 101 à 180 sièges | 181 à 250 sièges | Canada | É.U. | | |
| Distance (km) | CO (en g/passager) | | | | | | |
| 300 | 26 | 19 | 16 | 30 | 60 | 2 | 326 |
| 500 | 33 | 25 | 21 | 50 | 100 | 3 | 544 |
| 700 | 41 | 31 | 26 | 70 | 140 | 4 | 761 |
| 900 | 49 | 37 | 31 | 90 | 180 | 5 | 978 |
| Distance (km) | SO ₂ (en g/passager) | | | | | | |
| 300 | 15 | 11 | 9 | 0,12 | 0,18 | 0,1 | 0,1 |
| 500 | 24 | 18 | 15 | 0,2 | 0,3 | 0,1 | 0,2 |
| 700 | 34 | 26 | 21 | 0,28 | 0,42 | 0,1 | 0,3 |
| 900 | 44 | 33 | 27 | 0,36 | 0,54 | 0,2 | 0,4 |

La figure 2.7 illustre les résultats pour les émissions de NO_x.

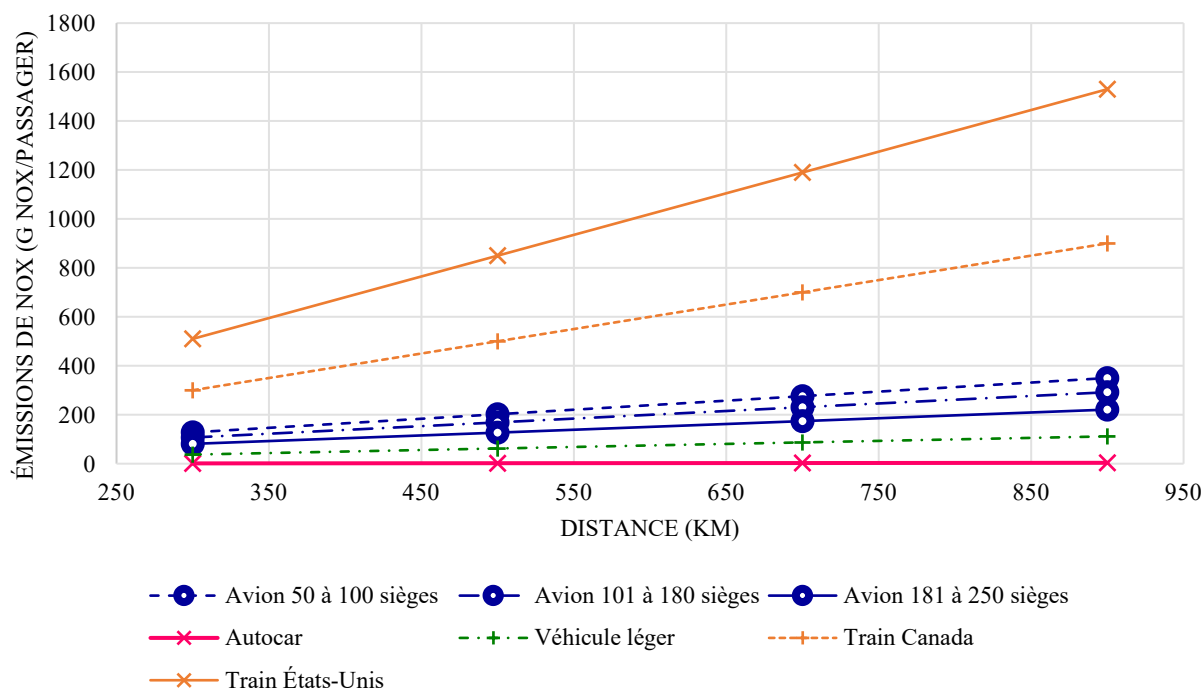


Figure 2.7 : Émissions de NO_x exprimées en gramme par passager pour différents modes de transport au Canada et aux États-Unis

A l'instar des résultats obtenus pour les déplacements en France, les trains sont les moyens de locomotion générant le plus de NO_x par passager quel que soit la distance parcourue. Puis, viennent dans l'ordre le transport aérien, les véhicules légers et le transport par autocar.

La figure 2.8 regroupe les résultats concernant les émissions de CO par passager en fonction du nombre de kilomètres parcourus.

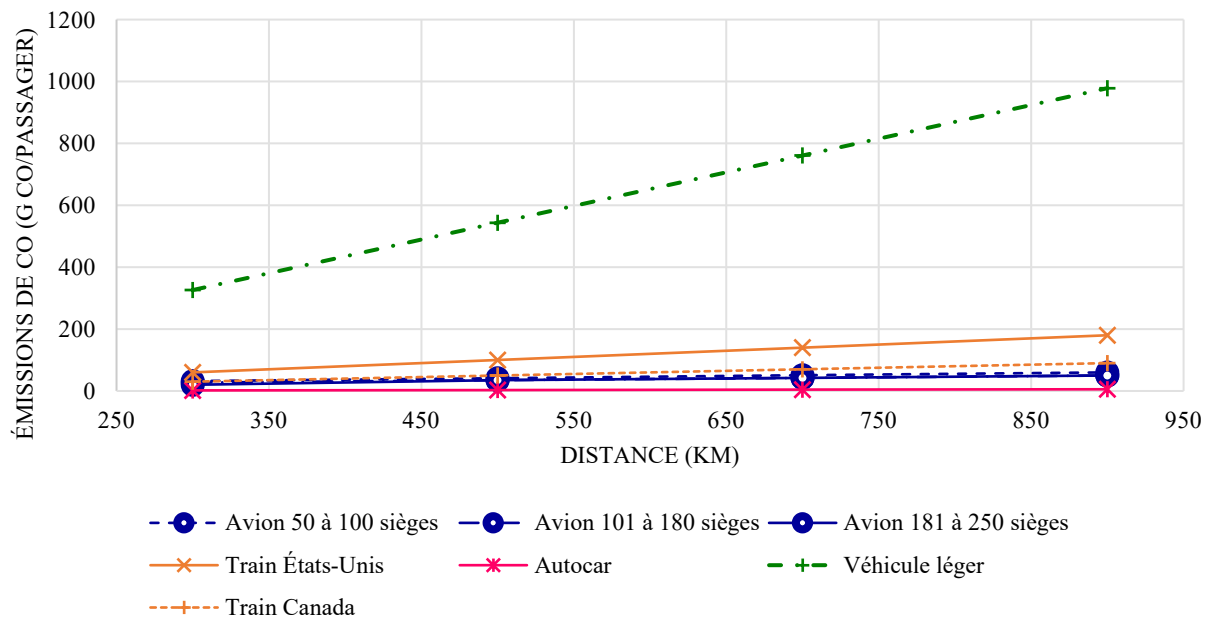


Figure 2.8 : Émissions de CO exprimées en gramme par passager pour différents modes de transport au Canada et aux États-Unis

De ce qui précède, les véhicules légers apparaissent être les sources de CO par passager et par kilomètre les plus intenses. Le transport par rail de passager est second, suivi par le transport aérien. Les autocars en comparaison n'émettent que peu de CO par passager pour les mêmes trajets effectués.

La figure 2.9 représente les émissions de SO₂ exprimées en gramme par passager pour les divers moyens de locomotion au Canada et aux États-Unis. De même que l'interprétation réalisée précédemment pour les transports en France, les émissions de SO₂ en intensité par passager sont dominées par les déplacements opérés en avion.

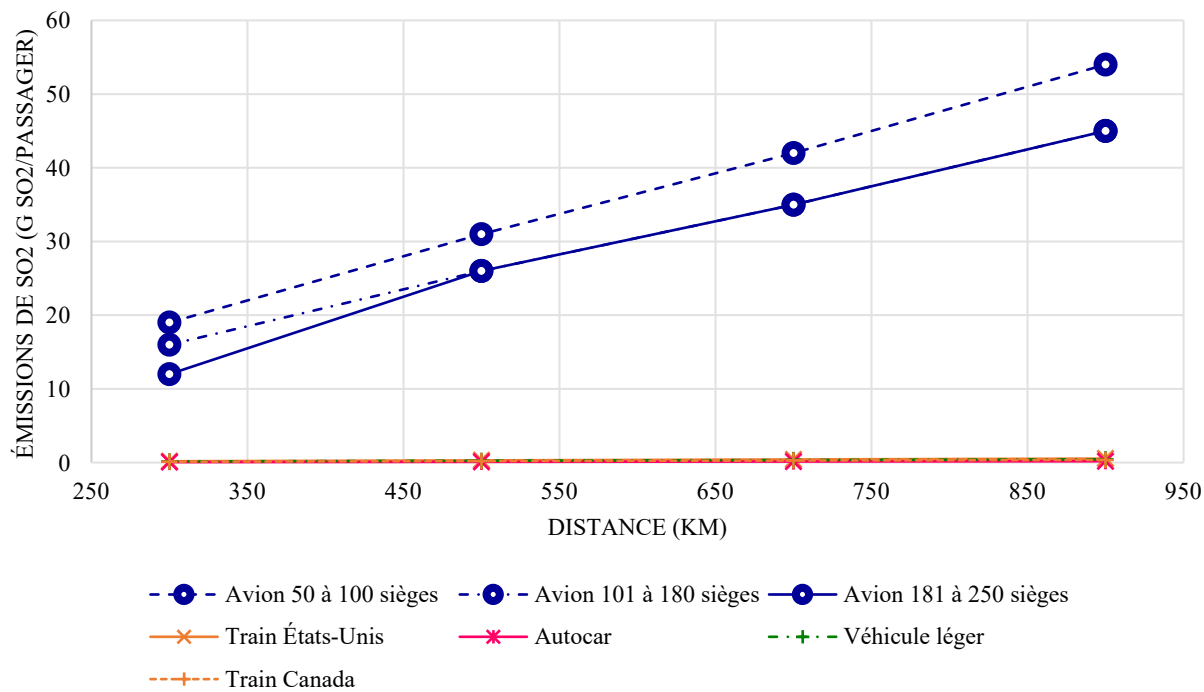


Figure 2.9 : Émissions de SO₂ exprimées en gramme par passager pour différents modes de transport au Canada et aux États-Unis

3. LES ENJEUX ÉCONOMIQUES ET SOCIAUX DES DIFFÉRENTS MODES DE TRANSPORT

Dans la continuité de la section 2, les modes de transport de voyageurs explorés précédemment à travers leurs impacts environnementaux sont dans cette section comparés à partir d'enjeux économiques et sociaux.

3.1. Le coût d'utilisation pour l'utilisateur

L'utilisation d'un moyen de transport a un coût économique, qui peut influencer l'utilisateur au moment de choisir lequel privilégier (ADEME, 2016). Cette sous-section a pour but d'établir quel moyen de transport est le plus économique en fonction de la distance à parcourir et du lieu de voyage. Cependant, en raison des approximations effectuées, les prix calculés et cités ne sont qu'indicatifs. Par ailleurs, l'un des objectifs de ce travail étant d'évaluer la pertinence de remplacer l'avion par un autre mode de transport, les résultats obtenus sont comparés sur la base des distances correspondant aux liaisons aériennes les plus fréquentées. Ainsi, en s'appuyant sur les trente liaisons aériennes intérieures les plus fréquentées en France en 2018, l'intervalle kilométrique pertinent apparaît être compris entre 300 et 900 km (DGAC et MTES, 2019b).

3.1.1. L'avion

De nombreux paramètres entrent en compte dans la formation des tarifs appliqués par les compagnies aériennes en plus de leurs postes de dépense traditionnels (salaire des employés, redevances aéroportuaires...) (Fainsilber, 2016a). Il s'agit entre autres du nombre de sièges vendus sur une journée pour un même vol, de la proximité de la date d'achat avec la date de départ et de l'historique de vente concernant les ventes du vol en question. L'objectif pour les transporteurs aériens est double : optimiser le remplissage des appareils qu'ils exploitent tout en assurant la rentabilité des vols effectués. (Andrew, 2019; Fainsilber, 2016b) Dès lors, le coût d'utilisation pour l'utilisateur de l'avion ne peut être qu'approximé en raison de ses importantes fluctuations.

Une étude menée par un comparateur européen de voyages en ligne a établi le prix moyen pour parcourir 100 km en avion à l'intérieur d'un même pays. Elle fut menée en 2015 à partir des prix affichés sur le site internet de la compagnie et ne concerne que des pays européens. Ainsi, le prix moyen pour parcourir 100 km en France par voie aérienne fut évalué à 14,74 € pour l'année 2015. (Jenik, 2016 ; Omio, 2019) Cependant, les tarifs appliqués ne sont pas constants depuis 2015. Afin de renseigner ces variations, la DGAC publie mensuellement l'Indice des Prix du Transport Aérien de Passagers (IPTAP). Cette publication informe sur l'évolution globale des prix pour les passagers achetant leur billet en France. (MTES, 2019) Entre décembre 2015 et décembre 2016, les prix pour les vols intérieurs au départ de la métropole ont augmenté de 4,1 % (DGAC et MTES, 2017). Ils ont ensuite entre décembre 2016 et décembre 2017, puis décembre 2017 et

décembre 2018 diminué respectivement de 1,5 % et 1,9 % (DGAC et MTES, 2018, 2019). En appliquant successivement au prix moyen évalué pour l'année 2015 les variations enregistrées pour les années 2016, 2017 et 2018, le coût moyen pour voyager en France par voie aérienne a pu être estimé pour différentes distances. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3.1. Ils ont été convertis en dollar canadien à partir du taux de change, qui était au 22 novembre 2019 de 1,4661 (Banque du Canada, 2019).

Tableau 3.1: Prix moyen du trajet en avion en fonction de la distance parcourue en France

| Distance (km) | Prix moyen du trajet (€) | Prix moyen du trajet (\$ CA) |
|---------------|--------------------------|------------------------------|
| 300 | 45 | 66 |
| 500 | 75 | 110 |
| 700 | 105 | 154 |
| 900 | 135 | 198 |

Aux États-Unis, le Bureau of Transportation Statistics (BTS) évalue le prix moyen du billet d'avion en fonction de la distance intérieure parcourue. Les dernières données disponibles portent sur l'année 2017 et les résultats convertis en dollar canadien pour les tarifs et en kilomètre pour les distances se trouvent au tableau 3.2 (BTS et DOT, 2018). Les prix ont été convertis en dollar canadien à partir du taux de change, qui était au 22 novembre 2019 de 1,3287. Seules les informations portant sur les distances utilisées précédemment ont été conservées.

Tableau 3.2 : Prix moyen du trajet en avion en fonction de la distance parcourue aux États-Unis
(adapté de : BTS et DOT, 2018)

| Distance (km) | Prix moyen du trajet (\$ US) | Prix moyen du trajet (\$ CA) |
|---------------|------------------------------|------------------------------|
| 300 | 120 | 159 |
| 500 | 200 | 266 |
| 700 | 280 | 372 |
| 900 | 360 | 478 |

Concernant les prix appliqués au Canada, une étude similaire à celle citée précédemment a été réalisée sur l'année 2013. De cette étude, il est ressorti que le prix moyen pour parcourir 100 km au Canada par voie aérienne était de 23,72 € pour l'année 2013. (Iakovou, 2014) Or, comme préalablement invoqué, les tarifs ont évolué depuis. En effet, selon Statistique Canada les prix des services aériens de passagers pour le secteur intérieur ont diminué de 11,4 % entre 2013 et 2017. (Statistique Canada, 2019e) Il n'est pas possible de connaître l'évolution sur l'année 2018, car les données pour les vols intérieurs sont jugées trop peu fiables pour être publiées (Statistique Canada, 2019i). Dans le tableau 3.3 sont regroupés les prix moyens des trajets en avion selon la distance parcourue au Canada, calculés à partir des informations précédentes.

Tableau 3.3 : Prix moyen du trajet en avion en fonction de la distance parcourue au Canada

| Distance (km) | Prix moyen du trajet (\$ CA) |
|---------------|------------------------------|
| 300 | 92 |
| 500 | 155 |
| 700 | 216 |
| 900 | 280 |

3.1.2. Le train

Plusieurs éléments entrent en compte dans la formation du prix de base d'un voyage par voie ferroviaire. La Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF) élabore ses prix de base à partir de deux paramètres : le prix kilométrique et une constante utilisée pour prendre en compte le niveau des remplissages des trains, la fréquentation des lignes et les prix proposés par la concurrence. Ainsi, les valeurs de ces deux paramètres sont fixées pour des intervalles kilométriques et sont applicables pour des trajets effectués en seconde classe. Elles sont de plus réévaluées de manière régulière par la SNCF, afin de suivre au mieux les évolutions du marché. (Finez, 2014 ; Société Nationale des Chemins de fer Français [SNCF], 2019) Le prix de base est alors calculé à partir de la formule suivante : $P = a + bd$, où a est la constante et b le prix kilométrique (SNCF, 2019). De ce fait, les prix de base pour diverses distances parcourues ont été déterminés, étant en euro ils ont été convertis en dollar canadien. Ces derniers se trouvent dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Prix de base du trajet en train en fonction de la distance parcourue en France

| Distance (d) en km | Constante (a) | Prix kilométrique (b) | Prix moyen du trajet (€) | Prix moyen du trajet (\$ CA) |
|--------------------|---------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|
| 300 | 7,7577 | 0,1209 | 44 | 65 |
| 500 | 18,4449 | 0,0921 | 65 | 95 |
| 700 | 18,4449 | 0,0921 | 83 | 122 |
| 900 | 32,2041 | 0,0755 | 100 | 147 |

La formation des prix de base de l'Amtrak, la compagnie ferroviaire publique américaine de transport de passager, n'est pas disponible au grand public. Cependant, elle publie les revenus perçus annuellement par la vente de ticket et la fréquentation totale de ses lignes (Amtrak, 2017a, 2017b, 2019a). Grâce à ses données, BTS évalue le prix moyen déboursé par les voyageurs pour l'achat de leur billet. Ainsi, pour l'année 2018, le prix moyen du ticket était de 67,82 \$ US. (Amtrak, 2019 ; BTS et DOT, 2019) Toutefois, les dernières données disponibles concernant la distance moyenne parcourue par passager datent de 2016. Cette année-là, un passager parcourait en moyenne 334 km et déboursait en moyenne 70,10 \$ US. (BTS et DOT, 2019) Les prix moyens des trajets effectués par rail aux États-Unis sont répertoriés au tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Prix moyen du trajet en train en fonction de la distance parcourue aux États-Unis

| Distance (km) | Prix moyen du trajet (\$ US) | Prix moyen du trajet (\$ CA) |
|---------------|------------------------------|------------------------------|
| 300 | 72 | 96 |
| 500 | 120 | 159 |
| 700 | 167 | 222 |
| 900 | 215 | 286 |

VIA Rail Canada, société fédérale canadienne qui assure le transport ferroviaire de passager, ne divulgue pas comment elle établit ses prix de base. Mais, à l'instar de l'Amtrak, la société ferroviaire publique annuellement les revenus perçus à partir du transport de voyageurs, le nombre de passagers transportés et la distance moyenne qu'ils parcourent. (VIA Rail, 2017, 2018, 2019a) À partir des dernières données disponibles couvrant l'année 2018, le prix moyen par passager était de 77,77 \$ CA pour une distance moyenne parcourue de 336 km (VIA Rail, 2019). Ainsi, il est possible d'approximer le prix moyen du ticket pour des voyages de longueurs distinctes. Les valeurs obtenues sont présentées au tableau 3.6.

Tableau 3.6 : Prix moyen du trajet en train en fonction de la distance parcourue au Canada

| Distance (km) | Prix moyen du trajet (\$ CA) |
|---------------|------------------------------|
| 300 | 69 |
| 500 | 116 |
| 700 | 162 |
| 900 | 208 |

3.1.3. L'autocar

L'Autorité de régulation des transports, anciennement nommée Autorité de régulation des activités ferroviaires et routières, assure le bon fonctionnement et l'encadrement des activités concurrentielles dans le domaine des transports ferroviaire et routier en France. Elle effectue alors un suivi des tarifs appliqués par les différents opérateurs de transports interurbains. Elle a ainsi établi qu'en 2018, la fourchette de prix moyenne par passager pour parcourir 100 km était entre 5,2 € et 9,6 €, c'est-à-dire entre 7,6 \$ CA et 14,1 \$ CA. (Arafer, 2019b ; Autorité de régulation des transports, 2019) Pour faciliter la comparaison avec les autres modes de transport, la moyenne de cette fourchette a été considérée comme étant le prix moyen à déboursier pour parcourir 100 km en autocar. À partir de ce résultat, les tarifs moyens pour plusieurs distances ont été calculés et ont été reportés dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7 : Prix moyen du trajet en autocar en fonction de la distance parcourue en France

| Distance (km) | Prix moyen du trajet (\$ CA) |
|---------------|------------------------------|
| 300 | 33 |
| 500 | 54 |
| 700 | 76 |
| 900 | 98 |

Pour les déplacements interurbains effectués en autocar aux États-Unis, les dernières données disponibles recensées par le BTS datent de 2002 (BTS, 2019). Toutefois, une étude menée en 2017 sur les prix appliqués pour 4775 départs par l'une des deux plus importantes sociétés d'autocar aux États-Unis a établi cinq intervalles de distance pour lesquels les variations des prix étaient négligeables (Schwieterman, Klein et Levin, 2019). De ces intervalles, le coût moyen du trajet pour diverses distances parcourues aux États-Unis a été défini. Dans le tableau 3.8 se trouvent les résultats convertis en dollar canadien pour les tarifs et en kilomètre pour les distances.

Tableau 3.8 : Prix moyen du trajet en autocar en fonction de la distance parcourue aux États-Unis

| Distance (km) | Prix moyen du trajet (\$ US) | Prix moyen du trajet (\$ CA) |
|---------------|------------------------------|------------------------------|
| 300 | 24 | 32 |
| 500 | 40 | 53 |
| 700 | 56 | 74 |
| 900 | 72 | 96 |

Pour les déplacements interurbains effectués en autocar au Canada, les dernières statistiques portant sur le transport des voyageurs par autobus et le transport interurbain recensées par Statistique Canada portent sur l'année 2000 (Gouvernement du Canada et Statistique Canada, 2019). Cependant, une caractérisation de l'offre de transport interurbain au Québec a été réalisée en 2016 et a établi la relation linéaire suivante entre le prix du billet et la distance parcourue : $\text{Prix du billet (\$ CA)} = 0,1952 \times \text{nombre de kilomètres} + 3,3325$ (Barbier, 2016). Grâce à cette formule, les prix des billets correspondant aux distances étudiées ont été calculés et regroupés dans le tableau 3.9.

Tableau 3.9 : Prix moyen du trajet en autocar en fonction de la distance parcourue au Canada

| Distance (km) | Prix moyen du trajet (\$ CA) |
|---------------|------------------------------|
| 300 | 62 |
| 500 | 101 |
| 700 | 140 |
| 900 | 179 |

3.1.4. La voiture de location

La dernière méthode de locomotion considérée est la location d'une voiture à une agence spécialisée. Les hypothèses formulées concernant les critères de location sont : un kilométrage illimité, une prise en charge et une restitution dans un aéroport et une voiture roulant au gazole. De ce fait, les distances étudiées diffèrent dans certains cas légèrement des distances prises en exemple précédemment. De plus, des frais correspondants à la consommation de carburant ont été ajoutés. Ils servent à prendre en compte la politique

de carburant plein plein, c'est-à-dire restituer le véhicule en agence avec le réservoir de carburant complété. Enfin, le site internet de location © Rentalcars.com, 2019 a été utilisé pour déterminer quel était le prix moyen en fonction de la distance parcourue (Rentalcars.com, 2019). Les valeurs ont été prises le 23 novembre 2019, pour une prise en charge d'une durée de vingt-quatre heures, car les locations sont à la journée.

En France, la consommation moyenne des véhicules légers à essence est d'environ 7,51 litres pour 100 kilomètres (S&T Squared Consultants Inc., 2019). De plus, le prix moyen mensuel de vente au détail d'un litre d'essence était de 1,55 € en octobre 2019, soit 2,27 \$ CA (Institut national de la statistique et des études économiques, 2019a). À l'aide de ces données, le coût supplémentaire lié à la politique de plein plein a été évalué pour les différentes distances et ajouté au prix moyen du trajet. Les résultats sont présentés au tableau 3.10.

Tableau 3.10 : Prix moyen du trajet en voiture de location selon la distance parcourue en France

| Distance (km) | Lieu de prise en charge | Lieu de restitution | Prix moyen du trajet (\$ CA) | Prix moyen du trajet + carburant (\$ CA) |
|---------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|--|
| 279 | Aéroport LYS Lyon | Aéroport FNI Nîmes | 329 | 369 |
| 510 | Aéroport CDG Paris | Aéroport LYS Lyon | 351 | 417 |
| 703 | Aéroport CDG Paris | Aéroport TLS Toulouse | 353 | 446 |
| 900 | Aéroport CDG Paris | Aéroport TLN Toulon | 362 | 481 |

Aux États-Unis, la consommation moyenne des véhicules légers à essence est d'environ 8,40 litres pour 100 kilomètres (S&T Squared Consultants Inc., 2019). De plus, le prix moyen de vente au détail d'un litre d'essence était de 0,68 \$ US en novembre 2019, soit 0,91 \$ CA (U.S. Energy Information Administration, 2019a). Grâce à ses informations, le coût supplémentaire correspondant au report de la voiture de location le réservoir plein a été calculé et additionné au prix moyen du trajet. Les résultats sont regroupés au tableau 3.11.

Tableau 3.11 : Prix moyen du trajet en voiture louée selon la distance parcourue aux États-Unis

| Distance (km) | Lieu de prise en charge | Lieu de restitution | Prix moyen du trajet (\$ CA) | Prix moyen du trajet + plein (\$ CA) |
|---------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| 345 | Aéroport JFK New-York | Aéroport BOS Boston | 215 | 241 |
| 500 | Aéroport JFK New-York | Aéroport IAD Washington DC | 222 | 260 |
| 672 | Aéroport JFK New-York | Aéroport PIT Pittsburgh | 215 | 266 |
| 1096 | Aéroport JFK New-York | Aéroport CVG Cincinnati | 541 | 625 |

Au Canada, la consommation moyenne des véhicules légers à essence est d'environ 8,24 litres pour 100 kilomètres (S&T Squared Consultants Inc., 2019). De plus, le prix moyen de vente au détail d'un litre d'essence était de 1,21 \$ CA en octobre 2019 (Statistique Canada, 2019d). Les précédentes données ont permis de déterminer le coût supplémentaire au prix moyen du trajet. Au tableau 3.12 sont présentés les résultats obtenus.

Tableau 3.12 : Prix moyen du trajet en voiture louée selon la distance parcourue au Canada

| Distance (km) | Lieu de prise en charge | Lieu de restitution | Prix moyen du trajet (\$ CA) | Prix moyen du trajet + plein (\$ CA) |
|---------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| 270 | Aéroport YUL Montréal | Aéroport YQB Québec | 264 | 291 |
| 533 | Aéroport YUL Montréal | Aéroport YYZ Toronto | 308 | 361 |
| 771 | Aéroport YUL Montréal | Aéroport YSJ Saint-John | 625 | 702 |
| 941 | Aéroport YUL Montréal | Aéroport YGP Gaspé | 415 | 509 |

3.1.5. Synthèse des résultats

Les résultats obtenus dans les sous-sections précédentes sont compilés par pays afin de pouvoir les comparer. Dans cette perspective, une représentation graphique permet de visualiser en fonction de la distance à parcourir quel mode de transport est le plus économique.

Sur la figure 3.1 sont réunis les résultats attendant aux déplacements au France.

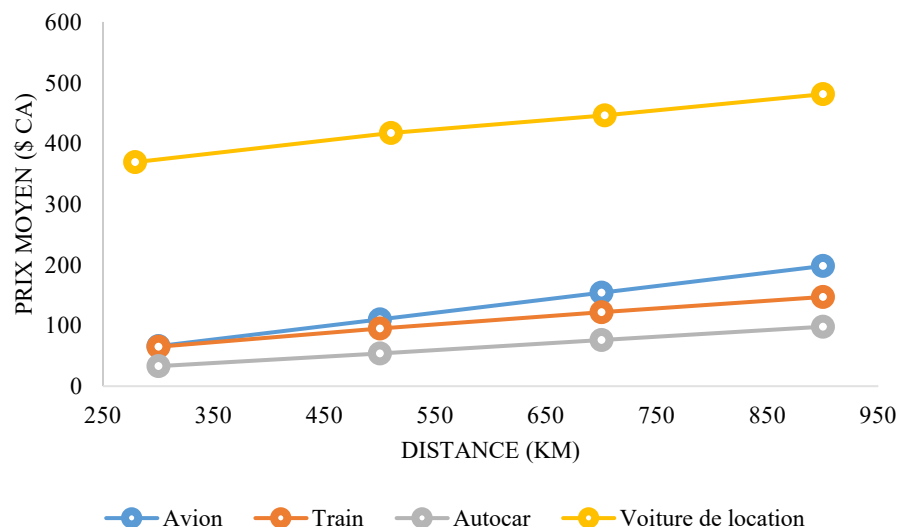


Figure 3.1 : Évolution du prix moyen du trajet en fonction de la distance parcourue et du mode de transport utilisé, pour des déplacements en France

Quelle que soit la distance à parcourir, ce qui précède indique l'autocar comme le transport le plus économique et le recours à la location de voiture comme le moyen de déplacement le plus onéreux. De plus, d'un point de vue purement monétaire, le train apparaît plus avantageux que l'avion.

Ensuite, les prix moyens pour les différents trajets réalisés aux États-Unis sont rassemblés à la figure 3.2.

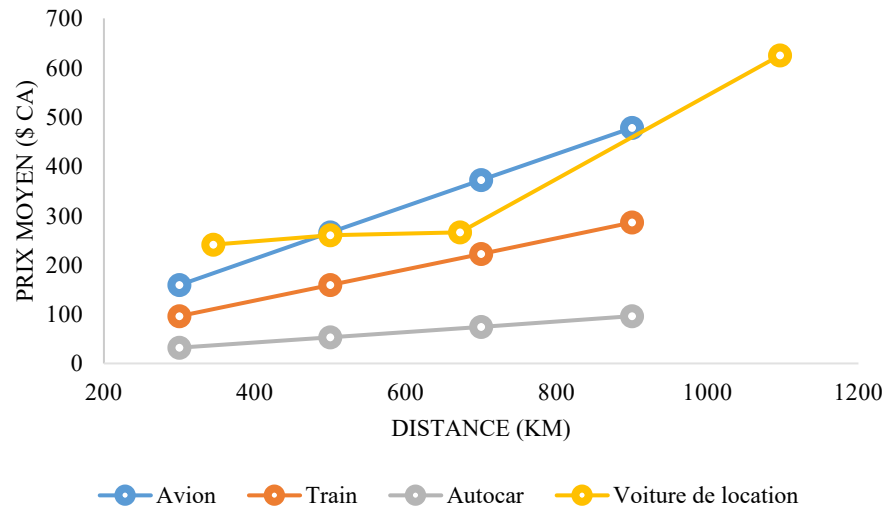


Figure 3.2 : Evolution du prix moyen du trajet en fonction de la distance parcourue et du mode de transport utilisé, pour des déplacements aux États-Unis

La figure 3.2 montre qu'indépendamment de la distance à parcourir, l'autocar est le moyen de locomotion le plus économique, suivi du train. Ensuite, louer une voiture de location est plus avantageux par rapport à l'utilisation de l'avion sur une certaine plage de distance. En effet, pour des trajets inférieurs à 500 km ou supérieurs à 900 km, l'avion devient plus abordable que la réservation de véhicule.

Enfin, les prix moyens pour les voyages effectués au Canada ont été reportés sur la figure 3.3 de manière à permettre une représentation plus compréhensible des différences survenant selon la distance parcourue.

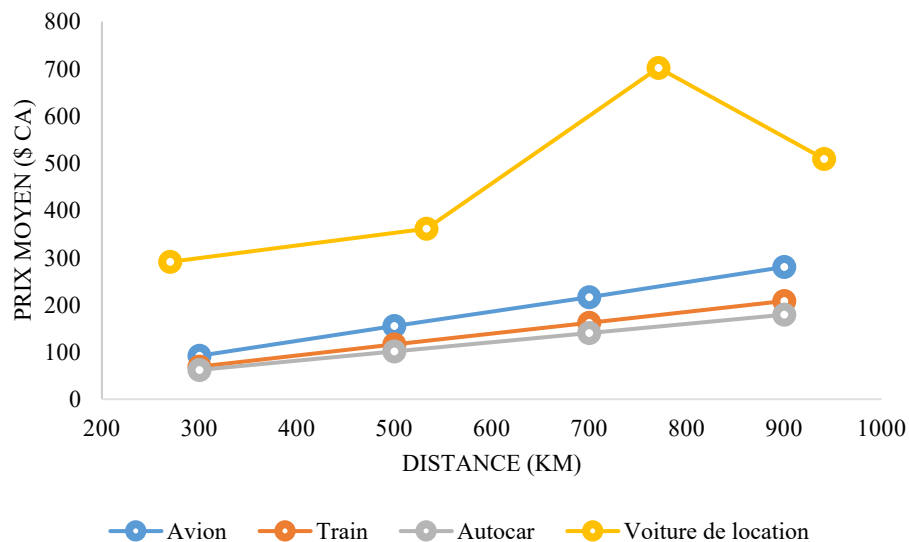


Figure 3.3 : Évolution du prix moyen du trajet en fonction de la distance parcourue et du mode de transport utilisé, pour des déplacements au Canada

Comme pour la France et les États-Unis, la location de voiture est le mode de transport le plus onéreux et à l'inverse l'autocar est le moyen le plus économique. De nouveau, les voyages effectués en train reviennent moins chers que ceux réalisés en avion.

En résumé, la location de voiture est apparue être le moyen de locomotion le plus onéreux, quelle que soit la zone géographique de déplacement ainsi que la distance à parcourir. À l'opposé, les déplacements en train transparaissent comme les plus économiques. Ces résultats donnent une indication sur la tendance vis-à-vis des montants engagés pour les différents modes de transport et permettent de déterminer quel mode de transport est le plus économique en fonction de la distance à parcourir. Néanmoins, ils pâtissent d'un manque de précision liée à la réalisation d'approximations et d'extrapolation menées à partir des données disponibles.

3.2. Les impacts socioéconomiques des différents modes de transport

Dans cette sous-section, les impacts socioéconomiques des différents modes de transport sont explorés à travers les emplois qu'ils génèrent et les rémunérations en vigueur dans les secteurs.

3.2.1. Les emplois générés

En France, le transport de voyageurs qui crée le plus d'emplois est le secteur de l'aviation. Ce dernier emploie 273 000 personnes et participe à travers ses chaînes d'approvisionnement, les dépenses de ses salariés et son concours au tourisme, à l'activité professionnelle de 869 000 travailleurs actifs (IATA, 2019a). Le transport intérieur de voyageur par rail est second en ce qui concerne le nombre d'emplois générés. Celui-ci était jusqu'au 1^{er} janvier 2020, et l'ouverture à la concurrence du marché ferroviaire, administré exclusivement par la SNCF (de Rocquiny, 2019). Toutefois, ce changement étant très récent, il n'avait pas encore entraîné des modifications significatives sur le plan économique au moment de la rédaction de l'essai. Ainsi seules les retombées économiques inhérentes aux activités de la SNCF ont été prises en compte. À travers les branches SNCF Réseau et SNCF Mobilités, respectivement responsables de la maintenance des infrastructures et des trains, 150 000 personnes travaillent directement au fonctionnement du transport par rail (Fernandez, 2018). À cela s'ajoutent les emplois directs et indirects liés aux gares ferroviaires. Ces dernières contribuent à 39 000 postes, dont la majeure partie est attribuable aux boutiques qu'elles abritent. En effet, pour un emploi consacré à l'opérationnalisation des gares, il y a 5,8 emplois qui sont liés aux dépenses dans les commerces qui y sont mis à disposition des voyageurs. (Arafer et SNCF, 2019 ; Steinmann, 2017) Le secteur de la location courte durée arrive troisième, puisque selon les dernières statistiques publiées, celui-ci emploie 12 727 personnes. Le nombre d'emplois indirects reliés à la location de courte durée uniquement est difficilement estimable, du fait qu'il touche un panel d'activités très diverses. Néanmoins, il fait partie à part entière d'un secteur plus large, celui des services de l'automobile qui emploie environ 409 000 salariés. (Association Nationale pour la Formation Automobile [ANFA], 2018) Enfin, le transport par autocar est celui créant le moins d'emploi. Les sociétés d'autocar opérant sur le territoire génèrent 2 563 postes à temps plein, chiffre qui regroupe la main d'œuvre directe et les sous-traitants (Arafer, 2019a).

À l'instar de la situation en France, l'aviation est le moyen de transport qui produit le plus d'emplois aux États-Unis. Il est à l'origine de 2,2 millions d'emplois directs et 4,3 millions d'emplois indirects en lien avec les dépenses du secteur, le niveau de vie des personnes travaillant dans ce dernier et son support à l'industrie touristique nationale (IATA, 2019d). Le second mode de transport en termes d'emplois créés est le secteur de la location automobile. Ce dernier représente environ 148 400 emplois directs (IBISWorld, 2019b). Ensuite, l'Amtrak, l'unique opérateur de transport interurbain de voyageur par rail, emploie

20 000 personnes afin d'assurer le fonctionnement et la maintenance de ses lignes (Amtrak, 2019b). De plus, en raison de ses activités quotidiennes et de sa participation à l'industrie touristique, la compagnie ferroviaire induit la création de plus de 100 000 postes à travers le pays (Amtrak, 2016). Et puis, le transport interurbain par autocar est le mode de transport générant le moins d'emploi aux États-Unis. En effet, 11 180 emplois directs sont recensés pour cette catégorie et ils s'accompagnent de 6 510 emplois indirects (Bureau of Labor Statistics, 2018b, 2018a).

De même que pour la France et les États-Unis le secteur de l'aviation donne lieu à la plus importante création d'emplois dans le domaine du transport de voyageurs au Canada. Les emplois directs qu'il suscite sont au nombre de 241 000, auxquels s'ajoutent 391 000 emplois indirects incités par la chaîne d'approvisionnement et les dépenses des salariés du secteur, ainsi que la contribution au tourisme (IATA, 2019e). De nouveau, la location de voitures particulières arrive en seconde position, étant donné que 17 294 postes en découlent directement (IBISWorld, 2019a). VIA Rail Canada emploie 3 115 employés pour assurer l'opérationnalisation de l'ensemble de son réseau (VIA Rail, 2019b). Afin d'estimer le nombre de postes indirectement causés par l'activité de la société ferroviaire, le nombre d'emplois directs a été multiplié par cinq. Ce coefficient correspond au rapport entre le nombre d'emplois directs et le nombre d'emplois indirects du transport de passager par rail aux États-Unis. Ainsi, il est possible d'approximer à environ 16 000 le nombre d'emplois indirects générés par VIA Rail. Enfin, le transport interurbain par autocar est celui créant le moins d'emploi. Les sociétés d'autocar opérant sur le territoire génèrent 2 809 postes à temps plein, statistique qui regroupe les chauffeurs, la maintenance et les fonctions nécessaires aux opérations (Statistique Canada, 2019g).

3.2.2. Les revenus

En France, le revenu moyen annuel brut s'élève à 35 856 €, soit environ 52 600 \$ CA (INSEE, 2019b). Concernant les modes de transport explorés, les salaires sont les plus élevés dans le transport aérien, avec une moyenne annuelle brute d'environ 51 400 €, soit 75 300 \$ CA. Le transport ferroviaire de voyageur est second, avec une rétribution brute d'environ 42 600 € par an, ce qui représente près de 62 500 \$ CA. (MTES, 2019b) Les personnes travaillant dans le secteur de la location courte durée d'automobiles gagnent en moyenne 30 692 € brut par année, ce qui représente environ 45 000 \$ CA (ANFA, 2018). Le secteur du transport interurbain par autocar ferme la marche, avec un salaire brut annuel d'environ 21 700 €, c'est-à-dire près de 31 900 \$ CA (MTES, 2019b).

Aux États-Unis, le revenu moyen annuel se chiffre à 52 145 \$ US, soit environ 60 600 \$ CA (Social Security Administration, 2019). Comme précédemment, les salaires sont les plus hauts dans le secteur aérien, avec une moyenne annuelle de 101 910 \$, soit environ 135 400 \$ CA. Le secteur ferroviaire est second, avec un

revenu annuel moyen de 64 380 \$, ce qui représente un peu moins de 85 500 \$ CA. Ensuite, les employés du secteur du transport interurbain par autocar perçoivent en moyenne 44 650 \$ par an, soit près de 59 300 \$ CA. Les personnes travaillant dans le secteur de la location de véhicules ont le salaire annuel le plus bas, avec en moyenne 31 200 \$, c'est-à-dire 41 460 \$ CA. (Bureau of Labor Statistics, 2019a)

Au Canada, le revenu moyen annuel s'élève à 45 600 \$ CA (Statistique Canada, 2019b). Les salariés du transport ferroviaire sont ceux recevant le salaire le plus élevé avec environ 98 944 \$ CA annuellement. Ils sont suivis des employés du secteur aérien, qui touchent en moyenne 73 863 \$ CA par année. (Statistique Canada, 2019a) Le secteur du transport interurbain par autocar troisième concernant la rémunération annuelle avec en moyenne un salaire de 61 591 \$ CA (Statistique Canada, 2019h). Le secteur de la location de véhicules est celui dont les travailleurs sont les moins bien payés avec en moyenne un salaire de 53 749 \$ CA par an (Statistique Canada, 2019a). Ainsi, qu'importe le mode de déplacement considéré, les revenus annuels moyens des emplois directs sont supérieurs à la moyenne canadienne.

Afin d'obtenir un point de comparaison des situations des différents pays, les écarts de salaire en pourcentage par rapport au revenu annuel moyen sont renseignés dans le tableau 3.13 pour chaque mode de transport.

Tableau 3.13 : Écart en pourcentage entre les revenus annuels moyens des différents modes de transport et le revenu annuel moyen national

| Mode de transport | France | États-Unis | Canada |
|---------------------|--------|------------|--------|
| Avion | +43% | +123% | +117% |
| Train | +19% | +41% | +62% |
| Autocar | -39% | -2% | +35% |
| Location de voiture | -14% | -32% | +18% |

Finalement, le tableau 3.13 montre que les salariés du secteur de l'aviation ou du transport ferroviaire ont des salaires annuels supérieurs aux moyennes nationales, et ceci est valable, quel que soit le pays considéré. Par ailleurs, les revenus des personnes travaillant dans les secteurs de l'autocar ou de la location de voiture au Canada sont également supérieurs à la moyenne nationale. La situation est différente en France et aux États-Unis, où les revenus annuels de ces deux secteurs y sont inférieurs.

3.2.3. L'influence de la durée du voyage sur le choix du mode de transport

Consciemment ou non, les personnes attribuent une valeur économique à leur temps. Cette pratique est d'autant plus marquée lorsqu'il s'agit de la durée d'un déplacement, étant donné que sa réduction est considérée comme une priorité pour les voyageurs. (Román et al., 2014) De manière à étudier son influence

sur le choix du mode de transport, la valeur monétaire des gains de temps de trajet, *value of travel time savings* (VOT), est estimée pour chaque mode de transport pour une heure. La VOT exprime alors la somme qu'un voyageur est prêt à déboursier pour réduire le temps de son voyage. Cette valeur varie en fonction du motif du déplacement (professionnel, personnel...) et du mode transport. (Abir, Burris et Spiegelman, 2017)

En France, en milieu interurbain, le calcul de la VOT varie selon la distance parcourue. En effet la méthode établie par le ministère de la Transition écologique et solidaire diffère pour les déplacements supérieurs à 400 km. Ainsi, pour des distances comprises entre 80 et 400 km, la VOT se décompose comme suit : $VOT = ad + b$, où a et b sont des constantes et d le kilométrage. Pour des parcours supérieurs à 400 km, les valeurs sont établies sur des bases horaires, à l'exception du transport aérien pour lequel des constantes sont encore utilisées. (MTES, 2019c) à partir de ces informations, les VOT correspondant à différentes longueurs de parcours ont été calculées et reportées dans le tableau 3.14.

Tableau 3.14 : VOT pour des trajets effectués en France selon la distance et le mode de transport

| | Mode de transport | Motif du déplacement | Distance en km | | | |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------|-----|-----|-----|
| | | | 300 | 500 | 700 | 900 |
| VOT en \$ CA/h | Avion | Professionnel | 114 | 115 | 115 | 155 |
| | | Personnel | 83 | 84 | 84 | 84 |
| | Train | Professionnel | 73 | 68 | 68 | 68 |
| | | Personnel | 40 | 35 | 35 | 35 |
| | Autocar | Professionnel | 43 | 44 | 44 | 44 |
| | | Personnel | 17 | 18 | 18 | 18 |
| | Véhicule particulier | Professionnel | 52 | 54 | 54 | 54 |
| | | Personnel | 31 | 23 | 23 | 23 |

Au vu des résultats précédents, l'avion apparaît être le mode de transport pour lequel les passagers sont les prêts à déboursier le plus d'argent, dans l'optique de réduire la durée de leur trajet. Il est ensuite suivi par ordre décroissant des VOT, du train, du véhicule particulier et enfin de l'autocar.

En Amérique du Nord, les VOT sont estimées à partir du salaire horaire moyen, auquel est appliqué un pourcentage qui diffère selon la cause du déplacement et le moyen de locomotion utilisé. Cependant, contrairement au cas précédent, la distance n'est pas directement prise en compte dans l'estimation des VOT. (U.S. Department of Transportation, 2016; Victoria Transport Policy Institute, 2019) En 2019, le salaire horaire moyen s'établissait à 25,64 \$ US, soit environ 34 \$ CA aux États-Unis et en 2018, il était de 28,8 \$ CA au Canada (Bureau of Labor Statistics, 2019b; Statistique Canada, 2019c). Au tableau 3.15 sont regroupées les valeurs de VOT obtenues.

Tableau 3.15 : VOT pour des trajets effectués aux États-Unis ou au Canada selon le mode de transport

| Mode de transport | Motif du déplacement | Pourcentage du salaire horaire moyen recommandé (U.S. Department of Transportation, 2016) | VOT en \$ CA/h | |
|----------------------|----------------------|---|----------------|--------|
| | | | États-Unis | Canada |
| Avion | Professionnel | 120 % | 41 | 35 |
| | Personnel | 90 % | 31 | 26 |
| Train | Professionnel | 120 % | 41 | 35 |
| | Personnel | 90 % | 31 | 26 |
| Autocar | Professionnel | 80 % | 27 | 23 |
| | Personnel | 60 % | 20 | 17 |
| Véhicule particulier | Professionnel | 80 % | 27 | 23 |
| | Personnel | 60 % | 20 | 17 |

L'avion et le train sont les modes de transport pour lesquels les VOT sont les plus élevées, puisque le pourcentage à appliquer au salaire moyen est le plus haut. L'autocar et l'utilisation d'un véhicule particulier sont les moyens de locomotion au regard desquels les voyageurs sont prêts à déboursier des sommes moins importantes.

En résumé, les VOT valables pour des déplacements en France ont des valeurs supérieures aux VOT utilisées au Canada et aux États-Unis. Néanmoins, il ressort des résultats précédents que les passagers empruntant l'avion ou le train sont prêts à dépenser des sommes d'argent plus importantes que les utilisateurs des bus ou voitures individuelles afin de réduire leur temps de parcours.

4. ÉLABORATION DE LA GRILLE D'ANALYSE MULTICRITÈRE DE SUBSTITUABILITÉ D'UNE LIAISON AÉRIENNE PAR UN AUTRE MODE DE TRANSPORT

Dans une première sous-section, les résultats des deux sections précédentes sont compilés de manière à cibler les scénarios les plus probables en termes de mobilité du point de vue d'un passager. Puis le fonctionnement de la grille d'analyse multicritère est présenté.

4.1. Les moyens de transport empruntés

La longueur de l'itinéraire parcouru peut influencer le choix du mode de transport. Toutefois, pour les distances considérées dans le cadre de cet essai (jusqu'à 900 km), la voiture personnelle est le moyen de transport le plus plébiscité. En effet, pour des distances allant jusqu'à 800 km, la voiture est utilisée dans plus de 85 % des cas en Amérique du Nord. Cette proportion diminue, mais reste cependant majoritaire pour des trajets compris entre 800 et 900 km, étant donné qu'elle s'établit à environ 54 %. À l'inverse de la tendance observée pour l'automobile, le recours au transport aérien s'intensifie avec l'allongement du voyage à effectuer. En effet, il représente plus de 40 % des transports de 800 km à 1 600 km contre seulement environ 10 % des voyages de longueur inférieure. (BTS, 2017a, 2017b) La situation est similaire en France où la voiture individuelle est le moyen de locomotion le plus utilisé pour les voyages de moins de 1 000 km. Cependant, de même que précédemment, sa part diminue en parallèle de l'augmentation des kilomètres à parcourir. Celle-ci passe d'environ 71 % pour les déplacements de moins de 600 km à 57 % pour les mobilités comprises entre 600 et 1000 km. (Commissariat général au développement durable et MTES, 2018) Ainsi, les quatre moyens de transport sont conservés, quelle que soit la distance à parcourir. La prise en compte de la possibilité pour l'utilisateur d'emprunter ou non un des quatre modes de transport est modélisée dans la grille d'analyse multicritère par le critère existence du mode de transport.

Dans une logique de concision et de clarté, un unique coefficient pour les émissions de GES et pour chaque polluant atmosphérique a été déterminé par mode de transport et par pays. Pour la circulation par voie ferroviaire en France, seul le coefficient correspondant aux TGV a été conservé étant donné que seul ce type de train circule pour les distances étudiées (Arafer, 2019b). De même pour la circulation automobile, les coefficients employés respectent la composition du parc automobile de chaque pays entre véhicule au diesel et véhicule à essence. En France, la part des voitures particulières diesel dans le parc total de voitures particulières était de 59,1 % en 2018 (Manuel Godoy Hilario, 2019). Au Québec, les véhicules automobiles fonctionnant à l'essence représentent environ 92,2 % du parc automobile provincial (Statistique Canada, 2019f). La proportion a été prise sur le Québec, car les liaisons aériennes étudiées partent de Montréal. Enfin aux États-Unis, la part de véhicule à essence dans la flotte automobile est comparable à la situation

québécoise avec un pourcentage de 93 %. (U.S. Energy Information Administration, 2019b) Les coefficients utilisés dans la grille d'analyse multicritère sont regroupés dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Coefficients d'émission pour chaque polluant par pays en fonction du mode de transport

| Pays | Polluant | Coefficient d'émission (g/(passager×km)) | | | | | |
|------------|------------------|--|------------------|------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| | | Avion | | | Train | Autocar | Voiture |
| | | 50 à 100 sièges | 101 à 180 sièges | 181 à 250 sièges | | | |
| France | CO _{2e} | 155 | 117 | 97 | 3,4 | 23,4 | 83 |
| | NO _x | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0 | 3×10^{-3} | 134×10^{-3} |
| | CO | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0 | $4,7 \times 10^{-3}$ | 79×10^{-3} |
| | SO ₂ | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0 | $0,1 \times 10^{-3}$ | $0,4 \times 10^{-3}$ |
| États-Unis | CO _{2e} | 155 | 117 | 97 | 87,7 | 65 | 98 |
| | NO _x | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 1,7 | 4×10^{-3} | 124×10^{-3} |
| | CO | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,2 | $6,1 \times 10^{-3}$ | $1\,087 \times 10^{-3}$ |
| | SO ₂ | 0,05 | 0,04 | 0,03 | $6,0 \times 10^{-4}$ | $0,2 \times 10^{-3}$ | $0,5 \times 10^{-3}$ |
| Canada | CO _{2e} | 155 | 117 | 97 | 95,8 | 62 | 95 |
| | NO _x | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 1,7 | 4×10^{-3} | 124×10^{-3} |
| | CO | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,2 | $6,1 \times 10^{-3}$ | $1\,087 \times 10^{-3}$ |
| | SO ₂ | 0,05 | 0,04 | 0,03 | $6,0 \times 10^{-4}$ | $0,2 \times 10^{-3}$ | $0,5 \times 10^{-3}$ |

Pour le transport aérien, le coefficient d'émission est valable lors de la phase de vol dite de croisière. De plus, les coefficients sont valables pour des passagers voyageant en classe économique. Ainsi, afin de prendre en compte les émissions liées au cycle de décollage et d'atterrissage, 4 kg de CO_{2e} doivent être ajoutés au résultat obtenu, de même pour les polluants atmosphériques. Pour ces derniers, les valeurs sont de 14 g de NO_x, 15 g de CO et 1 g de SO₂ pour un appareil de 50 à 100 sièges, elles sont de 11 g de NO_x, 11 g de CO et 1 g de SO₂ pour un appareil de 101 à 180 sièges et de 9 g de NO_x, 9 g de CO et 1 g de SO₂ pour les appareils de 181 à 250 sièges.

4.2. Fonctionnement de l'analyse multicritère

L'analyse multicritère a pour but d'étudier la possibilité de remplacer des liaisons aériennes par d'autres modes de transport afin de limiter les émissions de GES attenantes au transport aérien. Toutefois, de manière à éviter de pénaliser directement l'utilisateur ou indirectement les personnes du secteur aérien, des critères complémentaires à la quantité de GES émis par les différents scénarios sont à prendre en compte. Les critères choisis sont alors l'existence d'une alternative semblable à la liaison aérienne envisagée, les émissions de GES, les émissions de polluants atmosphériques (NO_x, CO et SO₂), le coût d'utilisation pour l'utilisateur, la durée effective du voyage, le nombre d'occupations générées et la qualité de ces dernières. Pour les huit premiers critères énoncés, les performances des déplacements par voie ferroviaire, autocar et voiture de location sont comparées à celle réalisée par un trajet en avion. Cette mise en parallèle permet de visualiser quel mode de transport est le plus compétitif pour chaque point de comparaison. Les résultats du transport

aérien sont utilisés comme référence. Ensuite, les deux derniers critères servent à informer les utilisateurs de l'impact socio-économique auquel ils contribuent en privilégiant un mode de locomotion plutôt qu'un autre. Enfin, du point de vue des gestionnaires de projet au sens large, les dix critères permettent de confronter les différents moyens de transport autrement qu'à partir de considérations uniquement comptables.

4.3. Choix des critères d'analyse et justification

Les dix critères énoncés précédemment pour évaluer la substituabilité d'une liaison aérienne par un autre mode de transport plus économe en émission de GES sont définis au tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Définition des critères

| Critères | Définition |
|---|--|
| Existence d'une alternative semblable | Une alternative semblable à une liaison aérienne est la possibilité pour l'utilisateur de parcourir le même trajet sans avoir à changer de moyen de locomotion. |
| Durée effective du voyage | La durée effective du voyage représente le temps mis pour aller du point de départ au point d'arrivée, majoré du temps d'attente au départ et à l'arrivée. |
| Quantité de GES émis | La quantité de GES émis correspond aux émissions engendrées par un passager sur l'ensemble de son trajet. Les émissions sont restreintes à celles survenant lors de l'utilisation. La production, l'acheminement et la fin de vie des transports utilisés ne sont pas pris en compte. |
| Quantité d'autres polluants atmosphériques émis | La quantité de polluants atmosphériques émis correspond aux émissions engendrées par un passager sur l'ensemble de son trajet. Les émissions sont restreintes à celles survenant lors de l'utilisation. La production, l'acheminement et la fin de vie des transports utilisés ne sont pas pris en compte. Les polluants atmosphériques considérés sont NOx, CO et SO ₂ . |
| Coût d'utilisation pour l'utilisateur | Le coût d'utilisation pour l'utilisateur équivaut à la somme déboursée pour réaliser le déplacement. |
| Concordance entre la durée du voyage, le coût d'utilisation et la VOT | La VOT exprime la somme qu'un voyageur est prêt à déboursier pour réduire le temps de son voyage. La concordance entre la durée du voyage, le coût d'utilisation et la VOT équivaut à examiner que la somme déboursée par le voyageur est inférieure ou égale à ce qu'il est prêt à payer pour réduire le temps de base du trajet. |
| Nombre d'occupations générées | Le nombre d'occupations générées égale le nombre d'emplois directs et indirects engendrés par le secteur du mode de transport. |
| Rémunération des occupations générées | La qualité des occupation générées prend en compte la différence entre le salaire moyen des employés du secteur avec le salaire moyen national. |

Avant la possible suppression d'un mode de transport, il est nécessaire de s'assurer que les utilisateurs aient une alternative similaire à disposition afin de ne pas les pénaliser. C'est pourquoi l'existence d'une option semblable est le premier critère à considérer. Le deuxième critère est la durée du voyage, autre critère influant lors du choix du mode de transport. Par ailleurs, pour que la durée du voyage considérée soit équitable entre les modes de transport, le temps d'attente entre l'arrivée au point de départ et le départ effectif est ajouté au temps du voyage, de même que celui au point d'arrivée. Les valeurs utilisées sont introduites à la sous-section suivante. Ensuite, l'une des problématiques du transport aérien est l'intensité de ses émissions GES par passager et par conséquent l'implication de ce secteur dans les changements

climatiques. Les niveaux d'émission des différents modes de transport sont alors comparés afin d'apprécier les diminutions qui pourraient être atteintes. Il en est de même pour les émissions de polluants atmosphériques. C'est pourquoi les quatre critères suivants portent sur ces thèmes. De plus, effectuer un déplacement a un coût économique qui influence l'utilisateur sur son choix de mobilité. Pour cette raison, le coût d'utilisation doit être pris en compte. Il peut expliquer la décision des usagers et ainsi aiguiller les gestionnaires sur les incitatives financières à mettre en place pour les amener à changer de comportement. Le septième critère fait la synthèse entre la durée effective et le coût d'utilisation puisqu'il prend en compte l'influence de la valeur économique du temps sur nos choix. Ce critère permet de vérifier l'adéquation entre la somme que le passager est prêt à déboursier pour réaliser son trajet dans un temps réduit et la durée réelle de son déplacement. Le temps réduit est calculé à partir de la différence entre le temps de trajet le plus long et le temps de trajet du mode de transport considéré. Enfin, les deux derniers critères servent à confronter les performances des options de mobilité sur la base d'impacts socioéconomiques. Ces derniers sont le nombre d'emplois que les différents secteurs contribuent à créer, ainsi que la qualité de ces emplois, c'est-à-dire les niveaux de rémunération des salariés par rapport à la moyenne nationale.

4.4. Évaluation et pondération des critères

L'existence d'une alternative semblable est spécifiée dans la grille d'analyse multicritère en sélectionnant l'option Oui ou Non. Sélectionner Non entraîne le blocage des cellules suivantes pour le mode de transport. Cette action permet de conserver les solutions de mobilité déjà existantes et ainsi visualiser quelles sont celles qui pourraient remplacer la liaison aérienne.

La durée du voyage effective est déterminée en ajoutant à la durée prévue, l'avance recommandée aux voyageurs par les transporteurs sur l'horaire de départ. Cet ajout est valable pour les déplacements en avion, en train et en autocar. Pour les trajets effectués en avion, l'avance recommandée est de deux heures (AirFrance, s. d.). Pour les départs en train, arriver avec vingt minutes d'avance sur l'heure de départ est le délai recommandé par la SNCF (Oui.SNCF, 2019). Les compagnies d'autocar quant à elles recommandent à leurs clients de se présenter au point d'embarquement quinze minutes avant le départ (FlixBus, 2020; Limocar, 2020). Pour les déplacements effectués en voiture de location, les durées moyennes de trajet sont estimées à partir de l'application Google Maps. Enfin, concernant l'attente au point d'arrivée, un délai est rajouté uniquement pour les vols. En effet, dans les autres modes de transport le passager n'a pas à attendre avant de quitter l'infrastructure d'arrivée. Le temps d'attente dans les aéroports à l'arrivée est estimé à environ trente minutes pour les vols intérieurs (Le Gorrec, 2017). Ce critère est éliminatoire, car si la durée effective du déplacement avec une alternative de mobilité est supérieure à celle de la liaison aérienne, le moyen de locomotion n'est pas considéré comme un substitut viable. Toutefois, contrairement au blocage

survenant en cas de réponse négative pour le critère précédent, l'évaluation du mode de transport pour les critères restant est effectuée. Cela permet de visualiser quels pourraient être les bénéfices environnementaux si les performances temporelles des autres modes de transport étaient améliorées.

À partir de la distance kilométrique traversée, la quantité de GES émis par passager est estimée grâce aux coefficients d'émission établis à la section 2.1 et regroupés dans le tableau 4.1. Le même principe est utilisé pour les trois polluants atmosphériques sur la base des coefficients d'émission déterminés à la section 2.2 et réunis dans le tableau 4.1 également.

De même que pour le critère précédent, le coût d'utilisation pour l'utilisateur est calculé sur la base de la distance à parcourir. Les prix au kilomètre délimités à la section 3.1 sont exploités pour cette évaluation.

La concordance entre la durée effective du voyage, le coût d'utilisation et la VOT est vérifiée en comparant le tarif qu'un usager est enclin à payer pour réduire son temps de trajet avec le tarif appliqué par les transporteurs. Cette réduction de la durée du transport est calculée en faisant la différence entre le temps de trajet du mode de transport le plus lent avec celui considéré.

Les deux derniers critères sont indépendants des vols considérés et permettent la prise en considération de l'impact socioéconomique des différents modes de transport. Leur évaluation est donc la même, quel que soit le vol analysé.

L'un des objectifs de l'essai étant d'étudier la pertinence de remplacer l'avion par un autre mode de transport, l'évaluation des critères s'effectue en comparant les performances des alternatives de mobilité à celles du transport aérien. De plus, cette substitution de l'avion ayant pour but la diminution des GES et des impacts environnementaux du transport aérien, les quatre critères sur les émissions ont reçu une pondération égale à 2 tandis qu'elle est égale à 1 pour les autres critères. La signification de la pondération et de l'évaluation des critères sont définies au tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Pondération et évaluation des critères

| Pondération | Définition |
|--------------------|---|
| 1 | De meilleures performances concernant ce critère par rapport au transport aérien sont importantes, mais n'apportent pas une amélioration sur le plan environnemental. |
| 2 | De meilleures performances concernant ce critère par rapport au transport aérien sont indispensables sur le plan environnemental. |
| Évaluation | Définition |
| +1 | Pour ce critère, les performances du mode de transport étudié sont supérieures à celles de l'avion. |
| 0 | Pour ce critère, les performances du mode de transport étudié sont égales à celles de l'avion. |
| -1 | Pour ce critère, les performances du mode de transport étudié sont inférieures à celles de l'avion. |

Par conséquent, quatre critères ont une pondération de deux, quatre critères ont une pondération égale à un et deux critères sont critiques. Pour les quatre critères environnementaux, le coût d'utilisation pour l'utilisateur, la durée effective du voyage, le nombre d'emplois engendrés et la rémunération de ces derniers, l'évaluation des modes de transport s'effectue par rapport à l'avion comme indiqué dans le tableau 4.3. L'appréciation est différente pour la concordance entre la durée du voyage, le coût d'utilisation et la VOT. En effet, pour que le jugement soit pertinent, il vérifie l'infériorité ou l'égalité du tarif payé par les voyageurs avec la somme qu'ils sont prêts à déboursier en fonction du temps gagné grâce au mode de transport. En fin de compte, chaque mode de transport peut obtenir un total maximal de douze points. La manière d'interpréter le résultat obtenu est expliquée à la sous-section suivante.

4.5. Analyse et interprétation des résultats

La finalité de l'utilisation de la grille d'analyse multicritère est de se positionner sur la viabilité des alternatives de transport offertes aux voyageurs en comparaison avec les liaisons aériennes. Deux conditions doivent être réunies afin de qualifier un mode de transport de substitut viable à une liaison aérienne. Le tableau 4.4 présente les différents cas de figures possibles. Le total brut correspond à la somme des points obtenus pour les différents critères par chaque mode de transport.

Tableau 4.4 : Cas de figures possibles et interprétations en découlant

| Cas de figure possibles | Interprétations |
|--|---|
| Total des points < Total de l'avion Durée effective du mode de transport > Durée effective de l'avion | À partir des critères évalués, le mode de transport ne semble pas être un substitut viable à la liaison aérienne. |
| Total des points > Total de l'avion Durée effective du mode de transport > Durée effective de l'avion | À partir des critères évalués, le mode de transport ne semble pas être un substitut viable à la liaison aérienne. |
| Total des points < Total de l'avion Durée effective du mode de transport < Durée effective de l'avion | À partir des critères évalués, le mode de transport ne semble pas être un substitut viable à la liaison aérienne. |
| Total des points > Total de l'avion Durée effective du mode de transport < Durée effective de l'avion | À partir des critères évalués, le mode de transport semble être un substitut viable à la liaison aérienne. |

Ainsi, le total des points doit être supérieur à celui de l'avion, mais également la durée effective du trajet avec le mode de transport alternatif doit être inférieure à la durée effective du trajet effectué en avion. La condition restrictive concernant la durée effective du trajet a été rajoutée pour tenir compte du fait que l'attractivité de l'avion pour les utilisateurs provient majoritairement de sa rapidité (Autorité de la qualité de service dans les transports, 2019). Par ailleurs, à partir de la grille complétée, les points pour lesquels l'avion est plus performant que les autres offres de mobilité peuvent être identifiés. De cette manière, même s'il se révèle être incontournable dans certains cas, des pistes de réflexion pour arriver à privilégier des solutions moins polluantes sont obtenables.

5. APPLICATION DE LA GRILLE D'ANALYSE MULTICRITÈRE

Cette cinquième section sert à la mise en application la grille d'analyse afin de tester sa pertinence. Pour ce faire, neuf exemples ont été analysés. Les trois premiers exemples sont affectés aux trois liaisons aériennes les plus fréquentées au départ de Paris. Les trois exemples suivants sont destinés à trois des liaisons aériennes les plus importantes au départ de Montréal. Afin d'expliciter comment les grilles d'analyse ont été remplies, les calculs détaillés pour l'exemple 1 sont présentés à l'annexe A.

5.1. Exemple 1 : Liaison Paris – Toulouse

La liaison aérienne Paris – Toulouse a été la plus fréquentée en France en 2018, avec 3 188 196 passagers transportés (Vaudano et Sénecat, 2019). La distance entre les deux principaux aéroports de ces villes, Paris-Charles de Gaulle (CDG) et Toulouse-Blagnac (TLS), est de 602 km (ICAO, 2016). Les avions qui servent à effectuer cette liaison sont des avions de type A318, A319, A320, A321 et A332, ils comportent entre 110 et 230 sièges (Airbus, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e; ICAO, 2016). Les moyens de transport existent pour effectuer ce trajet par train, autobus ou voiture de location. Les temps des trajets considérés pour déterminer les durées effectives de voyage sont répertoriés dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Temps des trajets pour les quatre modes de transport en minutes

| Avion (Vaudano et Sénecat, 2019) | Train (Vaudano et Sénecat, 2019) | Autocar (CheckMyBus, 2020) | Voiture (Google Maps, 2020) |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 70 minutes | 257 minutes | 520 minutes | 374 minutes |

Au tableau 5.2 sont présentés les résultats de l'application de la grille d'analyse pour cette liaison. Il a été supposé que l'appareil utilisé comportait de 181 à 250 sièges.

Tableau 5.2 : Résultats de l'application de la grille d'analyse pour la liaison Paris - Toulouse

| Moyen de transport | | Avion | Train | Autocar | Voiture de location |
|---------------------------------------|-------------|-------|-------|---------|---------------------|
| Existence d'une alternative semblable | | Oui | Oui | Oui | Oui |
| Durée effective du voyage (min) | | 220 | 277 | 535 | 374 |
| Critère | Pondération | Avion | Train | Autocar | Voiture de location |
| Quantité de GES émis (kg/passager) | 2 | 60 | 2 | 14 | 50 |
| Performance pondérée | | 0 | 2 | 2 | 2 |
| Quantité de NOx émis (g/passager) | 2 | 124 | 0 | 2 | 81 |
| Performance pondérée | | 0 | 2 | 2 | 2 |
| Quantité de CO émis (g/passager) | 2 | 21 | 0 | 3 | 48 |
| Performance pondérée | | 0 | 2 | 2 | -2 |

Tableau 5.2 : Résultats de l'application de la grille d'analyse pour la liaison Paris – Toulouse (suite)

| Critère | Pondération | Avion | Train | Autocar | Voiture de location |
|--|-------------|--------|---|---|---|
| Quantité de SO2 émis (g/passager) | 2 | 18 | 0 | 0 | 0 |
| Performance pondérée | | 0 | 2 | 2 | 2 |
| Coût d'utilisation pour l'usager (\$ CA) | 1 | 132 | 108 | 66 | 452 |
| Performance pondérée | | 0 | 1 | 1 | -1 |
| Concordance entre la durée effective du voyage, le coût d'utilisation et la VOT | 1 | 441 | 151 | 0 | 62 |
| Performance pondérée | | 1 | 1 | -1 | -1 |
| Nombre d'occupations générées | 1 | 869000 | 189000 | 2563 | 12727 |
| Performance pondérée | | 0 | -1 | -1 | -1 |
| Écart en pourcentage entre les revenus annuels moyens et le revenu annuel moyen national | 1 | 43% | 19% | -39% | -14% |
| Performance pondérée | | 0 | -1 | -1 | -1 |
| TOTAL des points | | 1 | 8 | 6 | 0 |
| Conclusion (avec condition sur la durée effective) | | | N'est pas un substitut viable à la liaison aérienne | N'est pas un substitut viable à la liaison aérienne | N'est pas un substitut viable à la liaison aérienne |

La liaison aérienne Paris – Toulouse apparaît comme non remplaçable par les trois autres modes de transport étudiés. Pour l'autobus et la voiture de location, ces modes de transport sont plus longs. De plus, la voiture de location présente une performance globale plus faible que celle de la liaison aérienne. Concernant l'autocar, bien que meilleur sur les critères environnementaux, ce mode de transport pâtit de la durée du déplacement, ainsi que de ses impacts socioéconomiques médiocres en comparaison du secteur aérien. Il en est de même pour le secteur de la location de courte durée de véhicule automobile. De plus, ce mode de transport est économiquement moins intéressant que l'avion et est un plus gros émetteur de CO. Enfin, le transport de passager par voie ferroviaire obtient un total de point supérieur à celui de l'avion, mais est éliminé en raison d'une durée effective de voyage plus longue.

5.2. Exemple 2 : Liaison Paris – Nice

La liaison aérienne Paris – Nice fut la deuxième plus fréquentée en France en 2018, avec 3 119 857 passagers transportés (Vaudano et Sénecat, 2019). Les deux principaux aéroports de ces villes sont distants de 694 km (ICAO, 2016). Les avions qui servent à effectuer cette liaison sont des avions de type A318, A319, A320 et A321, ils comportent entre 110 et 200 sièges (Airbus, 2020a, 2020b, 2020c,

2020d, 2020e; ICAO, 2016). Des transports par train, autocar et voiture de location sont disponibles pour effectuer ce trajet. Les temps des trajets considérés pour déterminer les durées effectives de voyage sont répertoriés dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3 : Temps des trajets pour les quatre modes de transport en minutes

| Avion (Vaudano et Sénécat, 2019) | Train (Vaudano et Sénécat, 2019) | Autocar (CheckMyBus, 2020) | Voiture (Google Maps, 2020) |
|--|--|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 85 minutes | 333 minutes | 790 minutes | 510 minutes |

Au tableau 5.4 sont présentés les résultats de l'application de la grille d'analyse pour cette liaison. Il a été supposé que l'appareil utilisé comportait de 181 à 250 sièges.

Tableau 5.4 : Résultats de l'application de la grille d'analyse pour la liaison Paris - Nice

| Moyen de transport | | Avion | Train | Autocar | Voiture de location |
|--|--------------------|--------------|--------------|----------------|----------------------------|
| Existence d'une alternative semblable | | Oui | Oui | Oui | Oui |
| Durée effective du voyage (min) | | 235 | 353 | 805 | 510 |
| Critère | Pondération | Avion | Train | Autocar | Voiture de location |
| Quantité de GES émis (kg/passager) | 2 | 67 | 2 | 16 | 58 |
| Performance pondérée | | 0 | 2 | 2 | 2 |
| Quantité de NOx émis (g/passager) | 2 | 139 | 0 | 2 | 93 |
| Performance pondérée | | 0 | 2 | 2 | 2 |
| Quantité de CO émis (g/passager) | 2 | 14 | 0 | 3 | 55 |
| Performance pondérée | | 0 | 2 | 2 | -2 |
| Quantité de SO2 émis (g/passager) | 2 | 21 | 0 | 0 | 0 |
| Performance pondérée | | 0 | 2 | 2 | 2 |
| Coût d'utilisation pour l'usager (\$ CA) | 1 | 153 | 134 | 76 | 521 |
| Performance pondérée | | 0 | 1 | 1 | -1 |
| Concordance entre la durée effective du voyage, le coût d'utilisation et la VOT | 1 | 798 | 264 | 0 | 113 |
| Performance pondérée | | 1 | 1 | -1 | -1 |
| Nombre d'occupations générées | 1 | 869000 | 189000 | 2563 | 12727 |
| Performance pondérée | | 0 | -1 | -1 | -1 |

Tableau 5.4 : Résultats de l'application de la grille d'analyse pour la liaison Paris – Nice (suite)

| | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|
| Écart en pourcentage entre les revenus annuels moyens et le revenu annuel moyen national | 1 | 43% | 19% | -39% | -14% |
| Performance pondérée | 0 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| TOTAL des points | 1 | 8 | 6 | 0 | 0 |
| Conclusion (avec condition sur la durée effective) | | N'est pas un substitut viable à la liaison aérienne | N'est pas un substitut viable à la liaison aérienne | N'est pas un substitut viable à la liaison aérienne | N'est pas un substitut viable à la liaison aérienne |

La liaison aérienne Paris – Nice apparaît comme non remplaçable par les trois autres modes de transport étudiés. Comme pour l'exemple précédent, la voiture de location est plus long et obtient un total de points inférieur à celui de la liaison aérienne. La situation est identique pour le train et l'autobus, pour lequel la durée du déplacement exclut leur utilisation à la place de l'avion.

5.3. Exemple 3 : Liaison Paris – Marseille

La troisième liaison aérienne ayant transporté le plus de passagers sur des vols commerciaux en 2018 relie les villes de Paris et Marseille, avec près de 1 618 000 voyageurs (Vaudano et Sénecat, 2019). Leurs principaux aéroports sont séparés par 650 km (ICAO, 2016). Les avions qui servent à effectuer cette liaison sont des avions de type A318, A319, A320, A321 et A332, ils comportent entre 110 et 230 sièges (Airbus, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e; ICAO, 2016). Des transports par train, autocar et voiture de location sont disponibles pour effectuer ce trajet. Les temps des trajets considérés pour déterminer les durées effectives de voyage sont répertoriés dans le tableau 5.5.

Tableau 5.5 : Temps des trajets pour les quatre modes de transport en minutes

| Avion (Vaudano et Sénecat, 2019) | Train (Vaudano et Sénecat, 2019) | Autocar (CheckMyBus, 2020) | Voiture (Google Maps, 2020) |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 75 minutes | 185 minutes | 565 minutes | 425 minutes |

Au tableau 5.6 sont présentés les résultats de l'application de la grille d'analyse pour cette liaison. Il a été supposé que l'appareil utilisé comportait de 181 à 250 sièges.

Tableau 5.6 : Résultats de l'application de la grille d'analyse pour la liaison Paris - Marseille

| Moyen de transport | Avion | Train | Autocar | Voiture de location |
|---------------------------------------|-------|-------|---------|---------------------|
| Existence d'une alternative semblable | Oui | Oui | Oui | Oui |
| Durée effective du voyage (min) | 225 | 205 | 580 | 425 |

Tableau 5.6 : Résultats de l'application de la grille d'analyse pour la liaison Paris – Marseille (suite)

| Critère | Pondération | Avion | Train | Autocar | Voiture de location |
|--|-------------|--------|--|---|---|
| Quantité de GES émis (kg/passager) | 2 | 67 | 2 | 15 | 54 |
| Performance pondérée | | 0 | 2 | 2 | 2 |
| Quantité de NOx émis (g/passager) | 2 | 139 | 0 | 2 | 87 |
| Performance pondérée | | 0 | 2 | 2 | 2 |
| Quantité de CO émis (g/passager) | 2 | 22 | 0 | 3 | 51 |
| Performance pondérée | | 0 | 2 | 2 | -2 |
| Quantité de SO2 émis (g/passager) | 2 | 21 | 0 | 0 | 0 |
| Performance pondérée | | 0 | 2 | 2 | 2 |
| Coût d'utilisation pour l'usager (\$ CA) | 1 | 143 | 128 | 72 | 488 |
| Performance pondérée | | 0 | 1 | 1 | -1 |
| Concordance entre la durée effective du voyage, le coût d'utilisation et la VOT | 1 | 497 | 219 | 0 | 59 |
| Performance pondérée | | 1 | 1 | -1 | -1 |
| Nombre d'occupations générées | 1 | 869000 | 189000 | 2563 | 12727 |
| Performance pondérée | | 0 | -1 | -1 | -1 |
| Écart en pourcentage entre les revenus annuels moyens et le revenu annuel moyen national | 1 | 43% | 19% | -39% | -14% |
| Performance pondérée | | 0 | -1 | -1 | -1 |
| TOTAL des points | | 1 | 8 | 6 | 0 |
| Conclusion (avec condition sur la durée effective) | | | Est un substitut viable à une liaison aérienne | N'est pas un substitut viable à la liaison aérienne | N'est pas un substitut viable à la liaison aérienne |

L'autocar et la voiture de location ne sont pas des substituts viables à la liaison aérienne, car comme précédemment, ils sont plus longs et leurs impacts socioéconomiques ne sont pas comparables à ceux du secteur aérien. Cependant pour cette liaison, le train apparaît comme une alternative pertinente. En effet, cette dernière est d'une part plus rapide que l'avion et d'autre part induit sur l'environnement des effets négligeables par rapport à celui-ci. Ainsi, même si les critères socioéconomiques sont toujours à l'avantage du transport de passager par voie aérienne, dans certains cas, le train semble être un mode de transport plus durable. Par exemple dans le cas présent, les performances environnementales, économiques et la prise en compte du temps global de transport désignent le train comme une mobilité plus avantageuse pour les passagers.

5.4. Exemple 4 : Liaison Montréal - Québec

Les aéroports de Montréal et Québec sont respectivement les troisième et onzième aéroports canadiens en termes de trafic. L'aéroport international Pierre-Elliott-Trudeau de Montréal (YUL) a accueilli 18 749 546 passagers en 2018, et sur la même période, 1 690 850 personnes ont utilisé l'aéroport international Jean-Lesage de Québec (YQB). (Réseau québécois des aéroports, 2019) Les deux aéroports sont distants de 232 km (ICAO, 2016). Chaque semaine, 85 vols sont assurés au départ de YUL et à destination de YQB (Aéroports de Montréal, 2020a). Les avions qui servent à effectuer cette liaison sont entre autre des avions de type A319 et 737-800, ils comportent entre 142 et 189 sièges (Airbus, 2020b; Boeing, 2019; ICAO, 2016). Des transports par train, autocar et voiture de location sont disponibles pour effectuer ce trajet. Les temps des trajets considérés pour déterminer les durées effectives de voyage sont répertoriés dans le tableau 5.7.

Tableau 5.7 : Temps des trajets pour les quatre modes de transport en minutes

| Avion (Omio, 2020) | Train (VIA Rail, 2020) | Autocar (CheckMyBus, 2020) | Voiture (Google Maps, 2020) |
|-----------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 45 minutes | 198 minutes | 195 minutes | 160 minutes |

Au tableau 5.8 sont présentés les résultats de l'application de la grille d'analyse pour cette liaison. Il a été supposé que l'appareil utilisé comportait de 101 à 181 sièges.

Tableau 5.8 : Résultats de l'application de la grille d'analyse pour la liaison Montréal - Québec

| Moyen de transport | | Avion | Train | Autocar | Voiture de location |
|---------------------------------------|-------------|-------|-------|---------|---------------------|
| Existence d'une alternative semblable | | Oui | Oui | Oui | Oui |
| Durée effective du voyage (min) | | 195 | 218 | 210 | 160 |
| Critère | Pondération | Avion | Train | Autocar | Voiture de location |
| Quantité de GES émis (kg/passager) | 2 | 31 | 22 | 14 | 22 |
| Performance pondérée | | 0 | 2 | 2 | 2 |
| Quantité de NOx émis (g/passager) | 2 | 57 | 394 | 1 | 29 |
| Performance pondérée | | 0 | -2 | 2 | 2 |
| Quantité de CO émis (g/passager) | 2 | 18 | 46 | 1 | 252 |
| Performance pondérée | | 0 | -2 | 2 | -2 |

Tableau 5.8 : Résultats de l'application de la grille d'analyse pour la liaison Montréal – Québec (suite)

| Critère | Pondération | Avion | Train | Autocar | Voiture de location |
|--|-------------|--------|---|---|--|
| Quantité de SO ₂ émis (g/passager) | 2 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| Performance pondérée | | 0 | 2 | 2 | 2 |
| Coût d'utilisation pour l'utilisateur (\$ CA) | 1 | 72 | 53 | 46 | 186 |
| Performance pondérée | | 0 | 1 | 1 | -1 |
| Concordance entre la durée effective du voyage, le coût d'utilisation et la VOT | 1 | 10 | 0 | 2 | 16 |
| Performance pondérée | | -1 | -1 | -1 | -1 |
| Nombre d'occupations générées | 1 | 391000 | 19115 | 2809 | 17294 |
| Performance pondérée | | 0 | -1 | -1 | -1 |
| Écart en pourcentage entre les revenus annuels moyens et le revenu annuel moyen national | 1 | 117% | 62% | 35% | 18% |
| Performance pondérée | | 0 | -1 | -1 | -1 |
| TOTAL des points | | -1 | -3 | 6 | 0 |
| Conclusion (avec condition sur la durée effective) | | | N'est pas un substitut viable à la liaison aérienne | N'est pas un substitut viable à la liaison aérienne | Est un substitut viable à une liaison aérienne |

L'autocar et le train ne sont pas des substituts viables à la liaison aérienne étudiée, car la durée effective du voyage les exclut d'entrée. De plus, concernant l'option ferroviaire, les performances environnementales sur le plan des émissions de NO_x et de CO sont moindres que dans le cas de l'avion. Par ailleurs, même si le coût économique apparaît être aux bénéfices des alternatives, de même que pour la France, le secteur aérien surclasse les autres secteurs en matière de retombées socioéconomiques positives. Néanmoins, pour cette liaison, la voiture ressort comme une alternative pertinente. En effet, cette dernière est d'une part plus rapide que l'avion et d'autre part induit des effets négatifs sur l'environnement d'ampleur inférieure. Ainsi, même si la voiture ne résout pas la problématique des émissions de GES, elle est en comparaison de l'avion un moindre mal.

5.5. Exemple 5 : Liaison Montréal – Boston

Les vols vers l'aéroport international Logan de Boston (BOS) font partie des plus nombreuses connexions directes à destination des États-Unis à partir de YUL (Aéroports de Montréal, 2020b). Les aéroports de Montréal et Boston sont distants de 409 km (ICAO, 2016). Les avions qui servent à effectuer cette liaison

sont des avions de type CRJ et E75, ces appareils comportent jusqu'à 90 sièges (Bombardier, 2020; Embraer, 2020; ICAO, 2016). Se rendre à Boston directement de Montréal par autocar ou voiture de location est également possible. Toutefois, il n'existe pas de connexions directes par rail. Les temps des trajets considérés pour déterminer les durées effectives de voyage sont répertoriés dans le tableau 5.9.

Tableau 5.9 : Temps des trajets pour les quatre modes de transport en minutes

| Avion (CheckMyBus, 2020) | Train | Autocar (CheckMyBus, 2020) | Voiture (Google Maps, 2020) |
|-----------------------------|-------|-------------------------------|--------------------------------|
| 80 minutes | - | 445 minutes | 280 minutes |

Au tableau 5.10 sont présentés les résultats de l'application de la grille d'analyse pour cette liaison. Il a été supposé que l'appareil utilisé comportait entre 50 à 100 sièges.

Tableau 5.10 : Résultats de l'application de la grille d'analyse pour la liaison Montréal – Boston

| Moyen de transport | | Avion | Train | Autocar | Voiture de location |
|--|-------------|--------|---------------------------|---|---|
| Existence d'une alternative semblable | | Oui | Non | Oui | Oui |
| Durée effective du voyage (min) | | 230 | - | 460 | 280 |
| Critère | Pondération | Avion | Train | Autocar | Voiture de location |
| Quantité de GES émis (kg/passager) | 2 | 63 | - | 25 | 39 |
| Performance pondérée | | 0 | - | 2 | 2 |
| Quantité de NOx émis (g/passager) | 2 | 123 | - | 2 | 51 |
| Performance pondérée | | 0 | - | 2 | 2 |
| Quantité de CO émis (g/passager) | 2 | 16 | - | 2 | 445 |
| Performance pondérée | | 0 | - | 2 | -2 |
| Quantité de SO2 émis (g/passager) | 2 | 20 | - | 0 | 0 |
| Performance pondérée | | 0 | - | 2 | 2 |
| Coût d'utilisation pour l'usager (\$ CA) | 1 | 127 | - | 82 | 327 |
| Performance pondérée | | 0 | - | 1 | -1 |
| Concordance entre la durée effective du voyage, le coût d'utilisation et la VOT | 1 | 100 | - | 0 | 51 |
| Performance pondérée | | -1 | - | -1 | -1 |
| Nombre d'occupations générées | 1 | 391000 | - | 2809 | 17294 |
| Performance pondérée | | 0 | - | -1 | -1 |
| Écart en pourcentage entre les revenus annuels moyens et le revenu annuel moyen national | 1 | 117% | - | 35% | 18% |
| Performance pondérée | | 0 | - | -1 | -1 |
| TOTAL des points | | -1 | - | 6 | 0 |
| Conclusion (avec condition sur la durée effective) | | | Ce substitut n'existe pas | N'est pas un substitut viable à la liaison aérienne | N'est pas un substitut viable à la liaison aérienne |

Dans ce cas de figure seules deux alternatives sont envisageables à la liaison aérienne. Toutefois, ces options de remplacement ne semblent pas pertinentes, puisqu'elles sont plus chronophages et pour la voiture la location les résultats de l'évaluation est inférieure à celui de l'avion.

5.6. Exemple 6 : Liaison Montréal – Toronto

L'aéroport international Pearson de Toronto (YYZ) est la destination canadienne la plus desservie à partir de YUL, à raison de 227 départs par semaine (Aéroports de Montréal, 2020a). Les aéroports YYZ et YUL sont séparés d'une distance de 505 km (ICAO, 2016). Les appareils qui effectuent les liaisons entre ces infrastructures aéroportuaires sont entre autres des A319, A320, A321, A332, 73H, E75... Ils comportent donc 90 et 230 sièges. (Airbus, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e; Boeing, 2019; Bombardier, 2020; ICAO, 2016) Le voyage de Montréal à Toronto peut s'effectuer par voie ferroviaire ou routière en plus de la voie aérienne. Les temps des trajets considérés pour déterminer les durées effectives de voyage sont répertoriés dans le tableau 5.11.

Tableau 5.11 : Temps des trajets pour les quatre modes de transport en minutes

| Avion (CheckMyBus, 2020) | Train (VIA Rail, 2020) | Autocar (CheckMyBus, 2020) | Voiture (Google Maps, 2020) |
|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 75 minutes | 290 minutes | 345 minutes | 290 minutes |

Au tableau 5.12 sont présentés les résultats de l'application de la grille d'analyse pour cette liaison. Il a été supposé que l'appareil utilisé comportait entre 181 et 250 sièges.

Tableau 5.12 : Résultats de l'application de la grille d'analyse pour la liaison Montréal – Toronto

| Moyen de transport | | Avion | Train | Autocar | Voiture de location |
|---|--------------------|--------------|--------------|----------------|----------------------------|
| Existence d'une alternative semblable | | Oui | Oui | Oui | Oui |
| Durée effective du voyage (min) | | 225 | 310 | 360 | 290 |
| Critère | Pondération | Avion | Train | Autocar | Voiture de location |
| Quantité de GES émis (kg/passager) | 2 | 53 | 48 | 31 | 48 |
| Performance pondérée | | 0 | 2 | 2 | 2 |
| Quantité de NOx émis (g/passager) | 2 | 110 | 859 | 2 | 63 |
| Performance pondérée | | 0 | -2 | 2 | 2 |
| Quantité de CO émis (g/passager) | 2 | 19 | 101 | 3 | 549 |
| Performance pondérée | | 0 | -2 | 2 | -2 |
| Quantité de SO2 émis (g/passager) | 2 | 16 | 0 | 0 | 0 |
| Performance pondérée | | 0 | 2 | 2 | 2 |
| Coût d'utilisation pour l'usager (\$ CA) | 1 | 157 | 116 | 101 | 404 |
| Performance pondérée | | 0 | 1 | 1 | -1 |

Tableau 5.12 : Résultats de l'application de la grille d'analyse pour la liaison Montréal – Toronto (suite)

| | | | | | |
|---|----------|-----------|--|--|--|
| Concordance entre la durée effective du voyage, le coût d'utilisation et la VOT | 1 | 59 | 22 | 0 | 20 |
| Performance pondérée | | -1 | -1 | -1 | -1 |
| Nombre d'occupations générées | 1 | 391000 | 19115 | 2809 | 17294 |
| Performance pondérée | | 0 | -1 | -1 | -1 |
| Écart en pourcentage entre les revenus annuels moyens et le revenu annuel moyen national | 1 | 117% | 62% | 35% | 18% |
| Performance pondérée | | 0 | -1 | -1 | -1 |
| TOTAL des points | | -1 | -2 | 6 | 0 |
| <i>Conclusion (avec condition sur la durée effective)</i> | | | <i>N'est pas un substitut viable à la liaison aérienne</i> | <i>N'est pas un substitut viable à la liaison aérienne</i> | <i>N'est pas un substitut viable à la liaison aérienne</i> |

La liaison aérienne Montréal – Toronto apparaît comme non remplaçable par les trois autres modes de transport étudiés. Concernant la voiture de location, d'une part ce mode de transport est plus long, et d'autre part il présente des performances globales identiques à celles de la liaison aérienne. Pour l'autocar et le train, bien que meilleurs sur le critère des émissions de GES, ces modes de transport pâtiennent de la durée du déplacement, ainsi que de leurs impacts socioéconomiques plus faibles que ceux du secteur aérien.

5.7. Comparaison des résultats de l'analyse multicritère des liaisons étudiées

Pour commencer concernant les liaisons françaises étudiées, il ressort que la voiture de location n'est pas une alternative durable à l'avion. En effet, les niveaux d'émissions de GES et de CO des véhicules automobiles thermiques sont comparables voire pires que les quantités d'émission du secteur aérien. De plus, le coût d'utilisation des voitures de location est plus élevé que l'achat d'un billet d'avion. Ensuite, sur le plan environnemental, l'autocar et le train ont des performances par passager bien meilleures que l'avion. Par ailleurs, au regard des tarifs appliqués pour les modes de transport, l'autocar est désigné comme le plus économique. Toutefois, en prenant en compte la durée effective du trajet, l'autocar est systématiquement disqualifié. En outre, ce mode de locomotion est celui pour lequel les voyageurs sont les moins enclins à déboursier d'argent. Enfin, le nombre d'emplois créés et leur rémunération rendent incontournable sur le court terme le secteur aérien économiquement parlant. En effet, le secteur ferroviaire et le secteur de l'autocar génèrent respectivement 4,6 et 339 fois moins d'emplois. En outre, les employés des sociétés d'autocar perçoivent en moyenne une rémunération annuelle inférieure à la moyenne nationale. D'un point de vue social, la création d'emplois dans le secteur aérien ou ferroviaire est donc plus souhaitable. Le

transport de voyageur par voie ferroviaire est alors le seul semblant pouvoir être une alternative viable, car en plus de présenter des performances environnementales intéressantes, ce secteur apporte des retombées sociales positives. De surcroît, dans certaines configurations, ce mode de transport est plus rapide que l'avion.

Ensuite, contrairement à précédemment le train n'est pas une alternative durable à l'avion dans l'état actuel des choses. Ses performances en matière d'émission de GES, de NOx et de CO par passager sont insuffisantes pour en faire une mobilité durable en comparaison de l'avion. La voiture de location présente également des performances environnementales médiocres par passager, les gains environnementaux du remplacement de l'avion par ces deux autres mobilités seraient alors limités. Toutefois sur le plan environnemental, l'autocar se différencie des autres modes avec des émissions plus faibles. À la suite de l'aspect environnemental, les critères socioéconomiques ne sont pas non plus à l'avantage des alternatives existantes. Puisque comme pour la situation en France, le secteur aérien génère des retombées positives supérieures à celles des autres secteurs. Par ailleurs, la durée effective des trajets est également dans la plupart des situations en défaveur des autres modes de transport.

6. LIMITES ET RECOMMANDATIONS POUR L'OUTIL

L'outil élaboré à la section 4 possède de nombreuses limites et également des imperfections en raison des approximations ou hypothèses effectuées. Pour commencer, le résultat délivré par la grille est influencé par les choix de l'opérateur, étant donné que la pondération des critères est fixée de manière subjective. Par exemple, dans la configuration utilisée à la section 5, seuls les critères environnementaux ont reçu une pondération de deux. Cette décision est justifiée par la volonté de donner un poids plus important aux impacts environnementaux, mais peut alors diminuer la portée des autres critères. Néanmoins, la durée effective des trajets a été fixée comme un critère éliminatoire. Par conséquent, ce dernier suffit à disqualifier directement des alternatives de transport pouvant être pourtant plus bénéfique pour l'environnement. La manière de prendre en compte la durée effective pourrait être revue, en y ajoutant une comparaison entre le temps perdu lors du voyage et le temps productif. C'est-à-dire, différencier le temps d'attente de celui où le voyageur peut vaquer à ses occupations dans la durée totale du déplacement. Une autre possibilité serait d'étudier de combien de temps les utilisateurs sont prêts à allonger leur voyage, en fonction des préjudices environnementaux évités.

Un autre défaut de la grille d'analyse est l'unique attention portée sur la phase d'utilisation du moyen de locomotion. En effet, comme précédemment indiqué, la production, l'acheminement et la fin de vie n'ont pas été pris en compte lors de l'évaluation. Il en est de même au regard de l'impact environnemental des infrastructures nécessaires au fonctionnement des différents modes de transport, les aéroports, le réseau ferroviaire incluant les gares, ainsi que le réseau routier. Les retombées environnementales et socioéconomiques de ces installations pourraient faire l'objet d'une recherche plus approfondie, afin d'avoir une vision non tronquée des répercussions des solutions de mobilité. En outre, les critères environnementaux ont été axés sur les émissions de GES et de polluants atmosphériques. Or d'autres pollutions sont provoquées par les divers secteurs de transport, telles que la pollution sonore ou la pollution liée à la production de l'énergie consommée pour le fonctionnement. En ajout, les facteurs employés pour calculer les émissions ne sont pas exacts, puisqu'ils résultent de moyennes et d'approximations. D'une part des moyennes entre les diverses technologies employées actuellement et d'autre part des approximations pour les données qui étaient valables pour un intervalle kilométrique.

Ensuite, les limites portent aussi sur les critères socioéconomiques. Le calcul du coût d'utilisation pour les usagers ne prend pas en compte les réductions éventuelles appliquées par les sociétés de transport ou les prix spéciaux pouvant être appliqués en fonction de tranches d'âge ou de la situation sociale. De même, les élévations de tarifs causées par une forte demande ou le délai entre l'achat et la date du déplacement ne sont pas intégrées dans l'approximation du coût d'utilisation pour le voyageur. À cela s'ajoutent les imprécisions

sur le nombre d'occupations générées, ainsi que sur la manière de les comparer. En effet, le nombre d'emplois directs et indirects liés aux différents secteurs de transport ne provenant pas des mêmes sources, il est possible que la méthodologie appliquée ne soit pas la même pour tous les transports. De ce qui précède découlent alors des imprécisions sur les nombres avancés. Cependant pour éviter de multiplier les erreurs, le critère est évalué non pas sur le nombre d'emplois, mais sur l'écart entre les deux grandeurs. Et il est peu probable, au vu des différences entre les nombres avancés, que l'ordre ne soit pas respecté. Et puis, le critère des rémunérations pour juger de la qualité de ces emplois peut être contesté parce qu'il est basé sur les revenus annuels moyens des personnes travaillant dans ce secteur. Or les moyennes masquent les disparités existantes et donc les écarts de salaires. De plus, la qualité d'une occupation ne se résume pas au salaire perçu, d'autres éléments entrent en compte tels que le stress au travail ou la qualité de ce dernier. Afin d'y remédier, d'autres critères pour évaluer les emplois des secteurs du transport pourraient être mis en place, tels que le nombre d'accidents au travail ou encore le taux de rotation du personnel. Par ailleurs, le nombre d'occupations générées et la rémunération de ces dernières sont des critères à manier avec précaution. Ils peuvent en effet servir à légitimer des impacts négatifs sur l'environnement sous couvert des bénéfices apportés à l'économie et aux personnes qui en vivent. Ainsi, pour éviter qu'ils encouragent l'immobilisme, leur prise en compte uniquement informative pourrait être envisagée. Elle permettrait de ne pas justifier des pratiques environnementalement dommageables pour des raisons sociales. Mais, elle appellerait la prise en compte des personnes possiblement impactées par l'évolution ou la mise en place de politiques.

À la suite des limites précédentes, l'obsolescence hypothétique de la grille peut également être soulignée, étant donné qu'elle est basée sur des données qui sont amenées à évoluer. En effet, d'éventuelles améliorations technologiques ou encore des changements de perception entre la nécessité d'aller vite et celle de préserver l'environnement peuvent entraîner l'inexactitude des coefficients utilisés dans l'outil. Ainsi, la mise à jour des facteurs en fonction de ces évolutions est requise pour continuer l'obtention de résultats non hors de propos.

Enfin, cet outil a pour but de donner une indication quant au possible remplacement de l'avion par une autre mobilité moins polluante. De ce fait, les performances du train, de l'autobus et de la voiture de location sont comparées à celles en vigueur dans le secteur aérien. La conclusion de l'outil n'est donc pas à comprendre dans le sens ce mode de locomotion est écologique, mais plutôt ce mode de locomotion est moins environnementalement dommageable que l'avion. En effet, l'outil permet de cibler des alternatives plus favorables au transport aérien, mais non exemptes d'émissions de GES.

CONCLUSION

Pour maintenir le réchauffement planétaire à 1,5 °C et ainsi limiter l'ampleur des changements climatiques, le GIEC appelle à des réductions draconiennes des émissions de GES (IPCC, 2018). Le transport est le troisième secteur économique en matière de quantité de GES émis, avec 14 % des émissions globales de GES qui lui sont imputables (United Nations Climate Change Secretariat, 2019). De plus, au cours des dernières années, tandis que les émissions de CO₂ des secteurs de l'industrie et de l'énergie ont diminué dans les pays de l'OCDE, celles du transport ont augmenté (ITF, 2019). Cette tendance est d'autant plus marquée dans le secteur aérien, dont les émissions de 2020 devraient être supérieures de 70 % à celles de 2005 (European Commission, 2016). Pour découpler la hausse des niveaux d'émissions de la croissance du secteur aérien, l'OACI mise sur diverses options, telles que l'utilisation de carburants alternatifs ou encore la mise en place d'un marché carbone (ATAG, 2018). Cependant, des changements structurels dans les transports, tels que le report d'une partie du trafic aérien sur le transport ferroviaire et par autocar, sembleraient plus pertinents pour atteindre le but voulu (Rogelj et al., 2018).

Ainsi, l'objectif principal de cet essai était de déterminer les conditions où l'avion pourrait être remplacé par des alternatives de transport plus durables dans divers contextes géographiques. Pour ce faire, les impacts environnementaux de l'avion, du train, de l'autocar et d'une voiture de location ont été documentés, de même que les enjeux économiques et sociaux de ces quatre modes de transport. Une grille d'analyse multicritère a été élaborée pour compiler les informations obtenues et permettre l'évaluation de la substituabilité de l'avion par un autre moyen de déplacement.

Cet essai aura dans un premier temps situé la problématique des transports dans la lutte contre les changements climatiques et notamment appuyé la contribution du secteur aérien aux émissions de GES actuelles et futures. Cette contribution de 543,3 Mt de CO₂ par an est censée augmenter de 50 % d'ici 2050 (ITF, 2019; Muntean, 2018). Dans un second temps, les impacts environnementaux des modes de transport ont été analysés, d'une part à travers les émissions de GES par kilomètre et par passager et d'autre part à travers les émissions de trois polluants atmosphériques. Il en est ressorti que l'avion était le plus gros émetteur de GES par passager et par kilomètre, hormis dans le cas d'une voiture nord-américaine fonctionnant à l'essence. Cette dernière a des émissions par passager et par kilomètre comparables à celles d'un avion comprenant entre 181 et 250 sièges. Concernant la pollution atmosphérique, les émissions de SO₂ sont aussi dominées par l'avion. Mais, les trains circulant au diesel émettent plus de NO_x et de CO par passager et par kilomètre que l'avion. Les véhicules légers nord-américains émettent également plus de CO par passager et par kilomètre. Les trains électriques sortent avantagés de cette comparaison, puisque leurs émissions de GES sont faibles par rapport aux autres modes de transport et celles des polluants

atmosphériques considérées comme négligeables. À la suite des impacts environnementaux, les enjeux économiques et sociaux des quatre moyens de locomotion ont été abordés. La voiture de location s'est révélée être le moyen de locomotion le plus onéreux, tandis qu'à l'inverse les déplacements en autocar sont les moins chers. Les tarifs appliqués dans les secteurs ferroviaire et aérien sont légèrement au bénéfice du train. Pour les impacts socioéconomiques considérés à travers les emplois générés par les quatre secteurs et les rémunérations en vigueur, le secteur aérien est apparu avoir l'effet le plus positif. En effet, quel que soit le pays, ce secteur génère le plus d'emplois directs et indirects, ainsi que les salaires moyens les plus élevés. Concernant les revenus, il est intéressant de noter que le secteur ferroviaire est le seul autre mode de transport dans lequel les revenus annuels moyens des employés sont supérieurs aux moyennes nationales.

Les quatrième et cinquième sections étaient consacrées à l'élaboration et à l'application de la grille d'analyse multicritère. L'outil est basé sur la comparaison entre les performances de l'avion et celles des autres options de mobilité. Ainsi, un critère est évalué positivement à la condition que le mode de transport témoigne d'une performance supérieure à celle de l'avion. Le choix a été fait de pondérer les critères environnementaux de manière plus importante, pour privilégier les enjeux environnementaux par rapport aux enjeux sociaux et économiques. Toutefois, une condition éliminatoire a été fixée sur la durée effective. Les moyens de locomotion pour lesquels la durée effective dépasse celle de l'avion sont automatiquement éliminés. Pour les applications effectuées, cette condition restrictive a entraîné l'élimination systématique de l'autocar et quasi systématique du train, malgré des totaux supérieurs à ceux de l'avion.

Finalement, cet essai fut l'opportunité d'essayer de déterminer quelles étaient les conditions qu'une mobilité devrait réunir pour pouvoir remplacer une liaison aérienne sans pénaliser l'utilisateur. Il a permis de montrer que les trains électriques et l'autocar sont dans l'état actuel des technologies et des infrastructures les moyens de locomotion les plus environnementalement intéressants pour se substituer à l'avion. Par ailleurs, les impacts environnementaux des modes de transport ont été limités à la phase d'utilisation. Or d'autres étapes, telles que la production ou la fin de vie causent également des impacts environnementaux. Déterminer si celles de l'autocar et du train sont moins dommageables que celles de l'avion seraient des arguments de plus en leur faveur. Toutefois, la durée effective de leurs trajets les pénalise, car plus longue que dans le cas de l'avion. Il serait alors opportun de regarder la durée effective du trajet sous l'angle de la productivité, c'est-à-dire, combien de temps un voyageur peut consacrer au cours d'un voyage à ses activités personnelles. En effet, si le temps perdu à attendre est plus important dans le cas de l'avion, le train et l'autocar pourraient apparaître plus profitables pour les voyageurs.

RÉFÉRENCES

- Abir, A. K. M., Burris, M. W. et Spiegelman, C. (2017). *The value of travel time and reliability: Empirical evidence from katy freeway* (vol. 2606).
- Aéroports de Montréal. (2020a). Destinations directes. Repéré à <https://www.admtl.com/fr/vols/destinations-directes>
- Aéroports de Montréal. (2020b). États-Unis. Repéré à <https://www.admtl.com/fr/vols/destinations-directes/etats-unis>
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie. (2018a). Chiffres clés. *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie*. Repéré à <https://www.ademe.fr/expertises/mobilite-transport/chiffres-cles-observations/chiffres-cles>
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie. (2018b). PCI et masse volumique. Bilans GES. Repéré à http://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?pci_et_masse_volumique.htm
- Airbus. (2020a). A318. *Airbus*. Repéré à <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a320-family/a318.html>
- Airbus. (2020b). A319neo. *Airbus*. Repéré à <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a320-family/a319neo.html>
- Airbus. (2020c). A320neo. *Airbus*. Repéré à <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a320-family/a320neo.html>
- Airbus. (2020d). A321neo. *Airbus*. Repéré à <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a320-family/a321neo.html>
- Airbus. (2020e). A330-200. *Airbus*. Repéré à <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a330-family/a330-200.html>
- AirFrance. (s. d.). Quand faut-il arriver à l'aéroport? *AirFrance*. Repéré à https://www.airfrance.fr/FR/fr/common/guidevoyageur/aeroport/enregistrement_hle.htm#heure-d-arrivee-a-l-aeroport-conseillee
- Air Transport Action Group. (2018). *Aviation benefits beyond borders - 2018*. Repéré à https://aviationbenefits.org/media/166344/abbb18_full-report_web.pdf
- Allen, M.R., Dube, O.P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., ... Zickfeld, K. (2018). *Framing and Context*. Dans V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, et T. Waterfield (dir.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (p. 49-92). Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter1_Low_Res.pdf
- Amtrak. (2016). *Amtrak's economic contribution*. Repéré à <https://www.amtrak.com/content/dam/projects/dotcom/english/public/documents/corporate/nationalfactsheets/Amtrak-Economic-Contribution-Brochure-083016.pdf>
- Amtrak. (2017a). *Monthly performance report for September 2016*. Repéré à <https://www.amtrak.com/content/dam/projects/dotcom/english/public/documents/corporate/monthlyperformancereports/Amtrak-Monthly-Performance-Report-September-2016-Final-Audited.pdf>

- Amtrak. (2017b). *Monthly performance report for September 2017*. Repéré à <https://www.amtrak.com/content/dam/projects/dotcom/english/public/documents/corporate/monthlyperformancereports/2017/Amtrak-Monthly-Performance-Report-September-2017-Preliminary-Unaudited.pdf>
- Amtrak. (2019a). *Monthly performance report for September 2018*. Repéré à <https://www.amtrak.com/content/dam/projects/dotcom/english/public/documents/corporate/monthlyperformancereports/2018/Amtrak-Monthly-Performance-Report-September-2018-Final.pdf>
- Amtrak. (2019b). *FY 2018 company profile - For the Period October 1, 2017 - September 30, 2018*. Repéré à http://media.amtrak.com/wp-content/uploads/2019/03/Amtrak-Corporate-Profile_FY2018_Pub-March-1-2019.pdf
- Andrew, P. (2019). *Science behind flight price*. Repéré à <https://www.skyscanner.com.sg/news/science-behind-flight-pricing>
- Arafer. (2019a). *Rapport annuel - Marché du transport par autocar et gares routières - Exercice 2018*. Repéré à https://www.arafer.fr/wp-content/uploads/2019/07/rapport_annuel_trv_2018.pdf
- Arafer. (2019b). *Le marché français du transport ferroviaire de voyageurs | 2018 : volume I*. Repéré à https://www.arafer.fr/wp-content/uploads/2019/08/bilan-marche-ferroviaire-voyageurs-2018-vol1_vf.pdf
- Arafer et Société Nationale des Chemins de fer Français. (2019). *Document de référence des gares de voyageurs - Horaires de service 2020*. Repéré à https://www.garesetconnexions.sncf/sites/default/files/2019-09/drg_2020_version_saisine_arafer_janvier_2019.pdf
- Association des chemins de fer du Canada. (2018a). *Programme de surveillance des émissions de locomotives | 2016*. Repéré à <https://www.railcan.ca/wp-content/uploads/2018/12/Rapport-SEL-2016.pdf>
- Association des chemins de fer du Canada. (2018b). *Tendances ferroviaires 2018*. Repéré à <https://www.railcan.ca/wp-content/uploads/2018/12/Tendances-ferroviaires-2018.pdf>
- Association Nationale pour la Formation Automobile. (2018). *Données sociales de la branche des services de l'automobiles*. Édition 2018.
- Autorité de la qualité de service dans les transports. (2019). *Comprendre les choix et l'expérience des voyageurs en matière de déplacements interurbains*. Repéré à http://www.qualitetransports.gouv.fr/IMG/pdf/comprendre_les_choix_et_l_experience_des_voyageurs_en_matiere_de_deplacements_urbains.pdf
- Autorité de régulation des transports. (2019). *L'Arafer devient l'Autorité de régulation des transports*. Arafer. Repéré à <https://www.arafer.fr/actualites/autorite-de-regulation-des-transport/>
- Baird, C. (2008). *Environmental chemistry* (4 ed.). New York : W.H. Freeman & Co.
- Banque du Canada. (2019). *Taux de change quotidiens*. Repéré à <https://www.banqueducanada.ca/taux/taux-de-change/taux-de-change-quotidiens/>
- Barbier, C. (2016). *Caractérisation de l'offre de transport interurbain par autocar au Québec* (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec). Repéré à https://publications.polymtl.ca/2240/1/2016_ClementineBarbier.pdf
- Bardoux, D. (2019). *Location courte durée : une conjoncture favorable*. Repéré à <https://www.agoranews-automobility.fr/location-courte-duree-une-conjoncture-favorable/>

- Boeing. (2019). Boeing Next-Generation 737. *Boeing*. Repéré à <https://www.boeing.com/commercial/737ng/>
- Bombardier. (2020). CRJ Series - Avions Régionaux | Bombardier Avions commerciaux. Repéré à <https://commercialaircraft.bombardier.com/fr/avions/crj-series?x=https>
- Bureau of Labor Statistics. (2018a). *May 2017 National Industry-Specific occupational employment and wage estimates NAICS 485200 - Interurban and rural bus transportation. Occupational employment statistics*. Repéré à https://www.bls.gov/oes/2017/may/naics4_485200.htm
- Bureau of Labor Statistics. (2018b). *Occupational employment and wages, may 2017 - 53-3021 Bus drivers, transit and intercity. Occupational employment statistics*. Repéré à <https://www.bls.gov/oes/2017/may/oes533021.htm>
- Bureau of Labor Statistics. (2019a). *Occupational employment and wages - May 2018*. Repéré à <https://www.bls.gov/news.release/pdf/ocwage.pdf>
- Bureau of Labor Statistics. (2019b). *Real earnings - October 2019*. Repéré à <https://www.bls.gov/news.release/pdf/realer.pdf>
- Bureau of Transportation Statistics. (2017a). Long-Distance Travel. Repéré à https://www.bts.gov/bts/archive/publications/highlights_of_the_2001_national_household_travel_survey/section_03
- Bureau of Transportation Statistics. (2017b). Table 4 Percent of Long-Distance Trips by Mode and Roundtrip Distance. Repéré à https://www.bts.gov/bts/archive/publications/highlights_of_the_2001_national_household_travel_survey/table_04
- Bureau of Transportation Statistics et U.S. Department of Transportation. (2018). *Domestic average air fares by distance traveled (current dollars), 2009 to 2017*. Repéré à <https://www.bts.gov/domestic-average-air-fares-distance-traveled-current-dollars-2009-2017>
- Bureau of Transportation Statistics et U.S. Department of Transportation. (2019). *National Transportation Statistics 2018*. Repéré à <https://www.bts.dot.gov/sites/bts.dot.gov/files/docs/browse-statistical-products-and-data/national-transportation-statistics/223001/ntsntire2018q4.pdf>
- Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique. (2019a). Base de données Ominea 2019. Repéré à https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/omine/BDD_OMINEA_A_EF_D-2019.zip
- Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique. (2019b). *Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France | OMINEA - 16ème édition*. Repéré à <https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/omine/OMINEA2019.pdf>
- CheckMyBus. (2020). Comparateur de bus – Billets pas chers | CheckMyBus. *CheckMyBus*. Repéré à <https://www.checkmybus.fr/#departureDate=2020-01-15&origin=Paris%2C%20France%2448.856614%2C2.3522219&destination=Toulouse%2C%20France%2443.604652%2C1.444209&sortValue=Price&sortOrder=ascending&radius=15&adults=1&filterTransportTypes=0>
- Clark, D. (2012). *Has the Kyoto protocol made any difference to carbon emissions? The Guardian*. Repéré à <https://www.theguardian.com/environment/blog/2012/nov/26/kyoto-protocol-carbon-emissions>

- Commissariat général au développement durable et Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2018). *La mobilité à longue distance des français en 2016*. Repéré à <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-11/datalab-essentiel-138-mobilite-longue-distance-2016-fevrier2018.pdf>
- de Coninck, H., Revi, A., Babiker, M., Bertoldi, P., Buckeridge, M., Cartwright, A., ... Sugiyama, T. (2018). *Strengthening and Implementing the Global Response*. Dans V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, et T. Waterfield (dir.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (p. 313-443). Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter4_Low_Res.pdf
- de Rocquiny, T. (2019). SNCF : dernière ligne droite avant la concurrence. Entendez-vous l'éco? France Culture. Repéré à <https://www.franceculture.fr/emissions/entendez-vous-leco/entendez-vous-leco-emission-du-vendredi-06-septembre-2019>
- Direction générale de l'Aviation civile. (2015). *Guide de calcul des émissions dues aux aéronefs - Guide technique*. Repéré à https://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/sites/default/files/calc_emis_aero.pdf
- Direction générale de l'Aviation civile. (2019). Calculateur d'émissions de gaz à effet de serre de l'aviation. Repéré à <https://eco-calculateur.dta.aviation-civile.gouv.fr/>
- Direction générale de l'Aviation civile et Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2017). *Indice des prix du transport aérien de passagers*. Repéré à <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/57-IPTAP-D%C3%A9cembre2016.pdf>
- Direction générale de l'Aviation civile et Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2018). *Indice des prix du transport aérien de passagers*. Repéré à https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/69-IPTAP_Déc2017.pdf
- Direction générale de l'Aviation civile et Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2019a). *Bulletin statistique - Trafic aérien commercial - Année 2018*. Repéré à https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/bulletin_stat_trafic_aerien_2018.pdf
- Direction générale de l'Aviation civile et Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2019b). *Indice des prix du transport aérien de passagers*. Repéré à https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/81-IPTAP_D%C3%A9c2018.pdf
- Embraer. (2020). E175. *Embraer*. Repéré à <https://www.embraercommercialaviation.com/commercial-jets/e175/>
- Environnement et Changement climatique Canada. (2019a). *Rapport d'inventaire des émissions de polluants atmosphériques du Canada : 1990-2017*. Repéré à http://publications.gc.ca/collections/collection_2019/eccc/En81-30-2017-fra.pdf
- Environnement et Changement climatique Canada. (2019b). *Rapport d'inventaire national 1990–2017 : sources et puits de gaz à effet de serre au Canada*. Repéré à http://publications.gc.ca/collections/collection_2019/eccc/En81-4-2017-2-fra.pdf voir le tableau A16-13
- European Commission. (2016). *Climate action - Reducing emissions from aviation*. Repéré à https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/aviation_en

- European Commission. (2019). *Energy, transport and environment indicators - 2019 edition*. Luxembourg : Publications Office of the European Union. Repéré à <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/10165279/KS-DK-19-001-EN-N.pdf/76651a29-b817-eed4-f9f2-92bf692e1ed9>
- European Environment Agency. (2016). *Occupancy rates*. European Environment Agency. Repéré à <https://www.eea.europa.eu/publications/ENVISSUENo12/page029.html>
- European Environment Agency. (2019). 1.A.3.b.i-iv Road transport 2019. Dans *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019*. Repéré à <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i/view>
- Fainsilber, D. (2016a). Comment est réellement fixé le prix des billets d'avion. Les Echos (site web). Repéré à <https://nouveau.eureka.cc/Link/unisher1/news%c2%b720160413%c2%b7ECF%c2%b7021835820109>
- Fainsilber, D. (2016b). Dans la jungle des tarifs aériens. Les Echos, p. 13.
- Fayolle, M. (2019). Êtes-vous prêts à renoncer à l'avion pour des raisons écologiques ? France Culture. Repéré à <https://www.franceculture.fr/emissions/hashtag/etes-vous-prets-a-renoncer-a-lavion-pour-des-raisons-ecologiques>
- Fernandez, J.-G. (2018). Nombre, statut, rémunération... trois questions sur les cheminots. Le Monde.fr. Repéré à https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2018/03/14/qui-ils-sont-statut-remuneration-trois-questions-sur-les-cheminots_5270940_4355770.html
- Felix, B. (2018). Greenhouse gas emissions gap wider than ever: U.N. report. Reuters. Repéré à <https://www.reuters.com/article/us-climate-change-emissions-idUSKCN1NW1MQ>
- Finez, J. (2014). La construction des prix à la SNCF, une socio-histoire de la tarification. De la péréquation au yield management (1938-2012). *Revue française de sociologie*, 55(1), 5-39.
- FlixBus. (2020). I. Pour les filiales de FlixBus : Conditions générales de transport. Repéré à <https://www.flixbus.fr/conditions-generales-de-reservation>
- Frutos, A. (2018). [Comité des Constructeurs Français d'Automobiles]. *Analyse de presse de 14h00 08/11/2018*. Repéré à <https://ccfa.fr/wp-content/uploads/2018/11/analyses-de-14h00-2018-11-08.pdf>
- Google Maps (2020). Repéré à <https://www.google.com/maps>
- Gouvernement du Canada et Statistique Canada. (2019). Statistique du transport des voyageurs par autobus et du transport urbain - Archivé. Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/n1/fr/catalogue/53-215-X>
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (2013). Glossaire. Dans T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (dir.), *Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques* (p. 185-204). Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_FR.pdf
- Iakovou, P. (2014). Go euro, et si ça vous simplifiait le voyage. Repéré à <https://www.luxsure.fr/2014/08/29/go-euro-si-ca-vous-simplifiait-le-voyage/>
- IBISWorld. (2019a). *Car Rental in Canada - Market Research Report*. Repéré à <https://www.ibisworld.com/canada/market-research-reports/car-rental-industry/>
- IBISWorld. (2019b). *Car Rental Industry in the US - Market Research Report*. Repéré à <https://www.ibisworld.com/united-states/market-research-reports/car-rental-industry/>

- Institut national de la statistique et des études économiques. (2019a). Prix moyens mensuels de vente au détail en métropole - Supercarburant sans plomb, indice d'octane 98 (1 litre). Repéré à <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/000442589>
- Institut national de la statistique et des études économiques. (2019b). Salaire dans le secteur privé. Repéré à <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4129807>
- Institut International du Froid. (2017). *Fiche de Synthèse | Le Protocole de Kyoto*. Repéré à http://www.iifir.org/userfiles/file/webfiles/regulation_files/Kyoto_FR.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Genève, Suisse : Intergovernmental Panel on Climate Change. Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). *Summary for Policymakers — Global Warming of 1.5°C*. Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf
- International Air Transport Association. (2019a). *Fact sheet: CORSIA*. Repéré à https://www.iata.org/pressroom/facts_figures/fact_sheets/Documents/corsia-fact-sheet.pdf
- International Air Transport Association. (2019b). *Carbon offsetting for international aviation*. Repéré à <https://www.iata.org/policy/environment/Documents/paper-offsetting-for-aviation.pdf>
- International Air Transport Association. (2019c). *The importance of air transport to France*. Repéré à https://www.iata.org/publications/economics/Reports/voa-country-reports/2019/IATA_France_Report.pdf
- International Air Transport Association. (2019d). *The value of air transport in the United States*. Repéré à <https://www.iata.org/about/worldwide/americas/Documents/Economic-Studies-USA-ENG-FINAL.pdf>
- International Air Transport Association. (2019e). *The value of air transport in Canada*. Repéré à <https://www.iata.org/about/worldwide/americas/Documents/Canada-The-Value-of-Air-Transport.pdf>
- International Civil Aviation Organization. (2016). *ICAO Carbon Emissions Calculator*. Repéré à <https://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset/Pages/default.aspx>
- International Energy Agency. (2019a). *CO₂ emissions by product and flow. IEA CO₂ Emissions from Fuel Combustion Statistics* (database).
- International Energy Agency. (2019b). *CO₂ emissions statistics - CO₂ emissions from fuel combustion 2018 overview*. Repéré à <https://www.iea.org/statistics/co2emissions/>
- International Transport Forum. (2019). *ITF Transport Outlook 2019*. Paris, France: OECD Publishing.
- Janssens-Maenhout, G., Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Olivier, J.G.J., Peters, J.A.H.W., et Schure, K.M. (2017). *Fossil CO₂ and GHG emissions of all world countries*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Jenik, C. (2016). Les pays européens où voyager est le plus cher. Statista Infographies. Repéré à <https://fr.statista.com/infographie/5709/les-pays-europeens-ou-voyager-est-le-plus-cher/>
- Lasalle, G. (2019). La « honte de prendre l'avion » gagne en popularité. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1202404/environnement-lutte-changements-climatiques-flygskam-vol>
- Le Gorrec, M. (2017). Combien de temps prévoir pour récupérer ses bagages ? Repéré à <https://www.linternaute.com/voyage/transports/1417758-aeroport-d-orly-les-20-questions-que-l-on-se-pose/1418731-temps-d-attente-bagages>

- Le Monde et Agence France-Presse. (2019). Quatre-vingt-treize parlementaires défendent les vols domestiques, « une nécessité vitale ». Le Monde. Repéré à https://www.lemonde.fr/politique/article/2019/06/23/quatre-vingt-treize-parlementaires-defendent-les-vols-domestiques-une-necessite-vitale_5480251_823448.html
- Limocar. (2020). Guide du voyageur. Repéré à <https://limocar.ca/guide-du-voyageur/#politique-utilisation>
- Mann, M. E. (2016). *Radiative forcing*. *Encyclopaedia Britannica*. Repéré à <https://www.britannica.com/science/radiative-forcing>
- Manuel Godoy Hilario, P. (2019). Part des voitures diesel dans le parc de voitures particulières en France 1990-2018. Repéré à <https://fr.statista.com/statistiques/480773/part-parc-voitures-diesel-voitures-particulieres-totale-france/>
- Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2017). Normes euros d'émissions de polluants pour les véhicules lourds - Véhicules propres. Repéré à <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/normes-euros-demissions-polluants-vehicules-lourds-vehicules-propres>
- Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2018). *Information GES des prestations de transport. Application de l'article L. 1431-3 du code des transports. Guide méthodologique*. Repéré à https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Info%20GES_Guide%20m%C3%A9thodo.pdf
- Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2019a). Indice des prix du transport aérien de passagers. Ministère de la Transition écologique et solidaire. Repéré à <http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/indice-des-prix-du-transport-aerien-passagers>
- Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2019b). *Chiffres clés du transport - Édition 2019*. Repéré à <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-04/datalab-52-chiffres-cles-du-transport-avril2019.pdf>
- Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2019c). *Valeurs de référence prescrites pour le calcul socio-économique*. Repéré à <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/V.2.pdf>
- Muntean, M., Guizzardi, D., Schaaf, E., Crippa, M., Solazzo, E., Olivier, J.G.J., et Vignati, E. (2018). *Fossil CO₂ emissions of all world countries - 2018 Report*. Luxembourg : Publications Office of the European Union.
- National Oceanic & Atmospheric Administration. (2019a). Combined Nitrous Oxide data from the NOAA/ESRL Global Monitoring Division.
- National Oceanic & Atmospheric Administration. (2019b). The NOAA annual greenhouse gas index (AGGI). Repéré à <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>
- National Oceanic & Atmospheric Administration. (2019c). Trends in Atmospheric Carbon Dioxide - Global monthly mean CO₂. Repéré à <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>
- National Oceanic & Atmospheric Administration. (2019d). Trends in Atmospheric Methane - Global CH₄ monthly means. Repéré à https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4/
- Olivier, M. J. (2017). *Chimie de l'environnement : hydrosphère, atmosphère, lithosphère, technosphère* (9^e éd.). Québec, Québec : Les productions Jacques Bernier.
- Olivier J.G.J. et Peters J.A.H.W. (2018). *Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions: 2018 report*. La Haye, Pays-Bas : PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Repéré à https://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2018-trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2018-report_3125.pdf
- Omio. (2019). Communiqués de presse. Repéré à <https://www.omio.fr/presse/communiques-de-presse>

- Omio (2020). Repéré à <https://www.omio.fr/>
- Organisation de l'aviation civile internationale. (2018). Le 4e Forum aéronautique mondial de l'OACI attire l'attention des participants des Amériques et des Caraïbes sur des priorités de développement clés. Repéré à <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/FR/Fourth-ICAO-World-Aviation-Forum-highlights-key-development-priorities-to-Americas-and-Caribbean-participants.aspx>
- Organisation de l'aviation civile internationale. (2019a). *CORSIA : Régime de compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale. Plan de mise en œuvre*. Repéré à https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Brochure/CorsiaBrochure-FR-Mar2019_Web.pdf
- Organisation de l'aviation civile internationale. (2019b). *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) — Frequently Asked Questions (FAQs)*. Repéré à https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_FAQs_September%202019_FINAL.PDF
- Oui.SNCF. (2019). Présentation à l'embarquement du train. *Oui.SNCF*. Repéré à <https://www.oui.sncf/aide/presentation-a-l-embarquement>
- Rentalcars.com. (2019). Repéré à <https://www.rentalcars.com/fr/>
- Réseau québécois des aéroports. (2019). Trafic de passagers aux principaux aéroports canadiens en 2017 et 2018. Repéré à <https://reseauquebecoisdesaeroports.ca/new/trafic-passagers-principaux-aeroports-canadiens/>
- Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Fifita, S., Forster, P., Ginzburg, V., ... Vilariño, M.V., (2018). *Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development*. Dans V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, et T. Waterfield (dir.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (p.93-174). Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf
- Román, C., Martín, J. C., Espino, R., Cherchi, E., Ortúzar, J. D. D., Rizzi, L. I., ... Amador, F. J. (2014). *Valuation of travel time savings for intercity travel: The Madrid-Barcelona corridor*. *Transport Policy*, 36, 105-117.
- Schwieterman, J. P., Klein, N. J. et Levin, A. (2019). *Direct to your destination: the size, scope and competitive status of express coach carriers in the United States*. *Transportation*, 46(4), 1487-1504.
- Selin, H. et Mann, M. E. (2019). *Global warming. Encyclopaedia Britannica*. Repéré à <https://www.britannica.com/science/global-warming>
- Simon, B. (2011). *Canada leaves Kyoto to avoid heavy penalties. Financial Times*. Repéré à <https://www.ft.com/content/cdb66522-2519-11e1-8bf9-00144feabdc0>
- Social Security Administration. (2019). *National average wage index*. Repéré à <https://www.ssa.gov/OACT/COLA/AWI.html>
- Société Nationale des Chemins de fer Français. (2019). Les tarifs voyageurs - mai 2019. Repéré à https://medias.sncf.com/sncfcom/pdf/tarif-voyageurs/Tarifs-voyageurs_CGV.pdf?_ga=2.249025409.787011554.1571682773-166861625.1570382846

- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R.B., Bernsten, T., Bindoff, N.L., ... Wratt, D. (2007). *Technical Summary*. Dans S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (dir.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* : (p. 19-91). Repéré à https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf
- S&T Squared Consultants Inc. (2019). GHGenius 5.0e.
- Statistique Canada. (2019a). Tableau | 36-10-0489-05 Rémunération totale par emploi, par industrie SCIAN. *Statistique Canada*. Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3610048905>
- Statistique Canada. (2019b). Tableau 11-10-0239-01 | Revenu des particuliers selon le groupe d'âge, le sexe et la source de revenu, Canada, provinces et certaines régions métropolitaines de recensement. *Statistique Canada*. Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=1110023901&pickMembers%5B0%5D=1.1&pickMembers%5B1%5D=2.1&pickMembers%5B2%5D=3.1&pickMembers%5B3%5D=4.3>
- Statistique Canada. (2019c). Tableau 14-10-0134-01 | Salaire hebdomadaire moyen, taux de salaire horaire et heures habituelles hebdomadaires moyennes selon la situation syndicale, données annuelles. *Statistique Canada*. Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=1410013401>
- Statistique Canada. (2019d). Tableau 18-10-0001-01 | Prix de détail moyens mensuel, essence et mazout, par géographie. Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=1810000101>
- Statistique Canada. (2019e). Tableau 18-10-0033-02 | Indice des prix des services aériens de passagers, variation en pourcentage. *Statistique Canada*. Repéré à https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=1810003302&fbclid=IwAR2ZD4PNWyBf3QShO8edOEFczGJxeWrDO1ZWc0x9b0wx1t7eGEn7A_v9xyI
- Statistique Canada. (2019f). Tableau 20-10-0021-01 | Immatriculations des véhicules automobiles neufs. Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=2010002101&pickMembers%5B0%5D=1.6&pickMembers%5B1%5D=3.1>
- Statistique Canada. (2019g). Tableau 23-10-0053-01 | Consommation de carburant diesel par l'industrie ferroviaire. Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=2310005301>
- Statistique Canada. (2019h). Tableau 23-10-0083-01 | Industries canadiennes du transport de passagers par autobus et du transport urbain, effectif et rémunération, selon l'industrie. *Statistique Canada*. Repéré à <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=2310008301>
- Statistique Canada. (2019i). Tarifs aériens, transporteurs aériens canadiens de niveau 1. *Statistique Canada*. Repéré à https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/51-004-x/51-004-x2019011-fra.htm?fbclid=IwAR3oqBhlxOCiHTUwqU_V7JH-iKtp6N7692pehyXWBIfM0HDSzev8cvFMYeY
- Steinmann, L. (2017). Comment les grandes gares sont devenues des centres commerciaux dynamiques. Repéré à <https://www.lesechos.fr/2017/08/comment-les-grandes-gares-sont-devenues-des-centres-commerciaux-dynamiques-180463>
- Transportpolicy.net. (2018a). Canada: Heavy-duty: Emissions. *Transportpolicy.net*. Repéré à https://www.transportpolicy.net/standard/canada-heavy-duty-emissions/?fbclid=IwAR1pGo7IH_8u8wDJZaj8tMX5PPNC2XuBQ0ONCSAE_Vqt_ji15LtlM5aUpOk
- Transportpolicy.net. (2018b). US: Fuels: Diesel and gasoline. *Transportpolicy.net*. Repéré à <https://www.transportpolicy.net/standard/us-fuels-diesel-and-gasoline/>

- Transportpolicy.net. (2018c). US : Heavy-duty: Emissions. *Transportpolicy.net*. Repéré à <https://www.transportpolicy.net/standard/us-heavy-duty-emissions/?fbclid=IwAR3k7u2o80MbMFHt-jtH8KyKRLZt6YibP4PjsKYsVnBbHdoxgy0DP0KneOU>
- United Nations Climate Change Secretariat. (2019). *Climate action and support trends*. Repéré à https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Climate_Action_Support_Trends_2019.pdf
- United Nations Environment Programme. (2018). *Emissions Gap Report 2018*. Nairobi, Kenya : United Nations Environment Programme. Repéré à https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26895/EGR2018_FullReport_EN.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2008). *Kyoto protocol reference manual on accounting of emissions and assigned amount*. Repéré à https://unfccc.int/resource/docs/publications/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2012). *Doha amendment to the Kyoto Protocol*. Repéré à <https://treaties.un.org/doc/Publication/CN/2012/CN.718.2012-Eng.pdf>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2019). *The Doha amendment*. Repéré à <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol/the-doha-amendment>
- United States Department of Transportation. (2016). *The value of travel time savings: departmental guidance for conducting economic evaluations revision 2 (2016 update)*. Repéré à <https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/docs/2016%20Revised%20Value%20of%20Travel%20Time%20Guidance.pdf>
- United States Energy Information Administration. (2019). *Gasoline and Diesel fuel update. Petroleum & other liquids*. Repéré à <https://www.eia.gov/petroleum/gasdiesel/>
- United States Environmental Protection Agency. (2016). *Light-duty vehicles and light-duty trucks: Clean fuel fleet exhaust emission standards*. Repéré à <https://nepis.epa.gov/Exec/ZipPDF.cgi?Dockey=P100O9ZJ.pdf&fbclid=IwAR10KVtdBTyGTcHCtJODODxmZ1rtoac8ltZYP4tJcQnvvg-kvxy4DkqTwQM>
- United States Environmental Protection Agency. (2018). *Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories*. Repéré à https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-03/documents/emission-factors_mar_2018_0.pdf
- United States Environmental Protection Agency. (2019). *Regulations for smog, soot, and other air pollution from passenger cars & trucks. Regulations for emissions from vehicles and engines*. Repéré à <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-smog-soot-and-other-air-pollution-passenger>
- Vaudano, M. et Sénécat, A. (2019). Quels trajets intérieurs en avion pourraient être interdits en cas d'alternative en train ? *Le Monde*. Repéré à https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2019/06/07/la-majorite-des-vols-interieurs-pourrait-se-faire-en-train-et-ce-serait-bon-pour-l-environnement_5472992_4355770.html
- VIA Rail. (2017). *Rapport annuel 2016*. Repéré à https://media.viarail.ca/sites/default/files/publications/2016_Annual%20Report_FR_0.pdf
- VIA Rail. (2018). *Rapport annuel 2017*. Repéré à https://media.viarail.ca/sites/default/files/publications/2017_Annual%20Report_FR_1.pdf
- VIA Rail. (2019a). *Rapport annuel 2018*. Repéré à https://media.viarail.ca/sites/default/files/publications/2018_Annual_Report_FR.pdf

- VIA Rail. (2019b). *Notre société en chiffres*. Repéré à https://media.viarail.ca/sites/default/files/inline-files/BusinessAtAGlance_2019_FR.pdf
- VIA Rail. (2020). Train Montréal-Québec. *VIA Rail*. Repéré à <https://www.viarail.ca/fr/decouvrez-nos-destinations/trains/quebec-et-ontario/montreal-quebec>
- Victoria Transport Policy Institute. (2019). *Transportation Cost and Benefit Analysis II – Travel Time Costs* | 5.2 Travel Time. Repéré à <https://www.vtpi.org/tca/tca0502.pdf>
- WWF-UK. (2017). *Grounded. Ten reasons why international offsetting won't solve heathrow's climate change problem*. Repéré à https://www.wwf.org.uk/sites/default/files/2017-05/WWF_Grounded_report_FINAL_1.pdf

ANNEXE A – DÉTAILS DES CALCULS POUR L'EXEMPLE 1 : LIAISON PARIS – TOULOUSE

La distance entre les deux aéroports est de 602 km et est notée d . Il est supposé que l'avion utilisé pour la liaison contient entre 181 et 250 sièges. Les durées des trajets sont rappelées dans le tableau A.1 suivant.

Tableau A.1 : Temps des trajets pour les quatre modes de transport en minutes

| Avion (Vaudano et Sénecat, 2019) | Train (Vaudano et Sénecat, 2019) | Autocar (CheckMyBus, 2020) | Voiture (Google Maps, 2020) |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 70 minutes | 257 minutes | 520 minutes | 374 minutes |

Le tableau A.2 présente le calcul des émissions des GES et des polluants atmosphériques. Les résultats sont arrondis à l'unité supérieure.

Tableau A.2 : Calculs des quantités de GES et des polluants atmosphériques

| Moyen de transport | Quantité de GES émis (kg/passager) | | Quantité de NOx émis (g/passager) | |
|--------------------|---------------------------------------|----------|---|----------|
| | Formule | Résultat | Formule | Résultat |
| Avion | $\frac{(d - 27) \times 97}{1000} + 4$ | 60 | $(d - 27) \times 0,2 + 9$ | 124 |
| Train | $(d \times 3,4)/1000$ | 2 | $d \times 0$ | 0 |
| Autocar | $(d \times 23,4)/1000$ | 14 | $d \times 3 \times 10^{-3}$ | 2 |
| Voiture | $(d \times 83)/1000$ | 50 | $d \times 134 \times 10^{-3}$ | 81 |
| Moyen de transport | Quantité de CO émis (g/passager) | | Quantité de SO ₂ émis (g/passager) | |
| | Formule | Résultat | Formule | Résultat |
| Avion | $(d - 27) \times 0,02 + 9$ | 21 | $(d - 27) \times 0,03 + 1$ | 18 |
| Train | $d \times 0$ | 0 | $d \times 0$ | 0 |
| Autocar | $d \times 4,7 \times 10^{-3}$ | 3 | $d \times 0,1 \times 10^{-3}$ | 0 |
| Voiture | $d \times 79 \times 10^{-3}$ | 48 | $d \times 0,4 \times 10^{-3}$ | 0 |

Pour ces critères, les performances des trois alternatives de transport sont comparées à celles de l'avion. L'avion a donc reçu la note de 0 et les modes de transport dont les émissions sont inférieures ont reçu la note de +1. Et comme ces critères ont une pondération de 2, leur note est alors de 2. Inversement, pour ceux ayant des performances inférieures, ils reçoivent la note de -1 et du fait de la pondération obtiennent une note pondérée égale à -2. Le tableau A.3 présente le calcul du coût d'utilisation pour l'utilisateur. Les résultats sont arrondis à l'unité supérieure.

Tableau A.3 : Calcul du coût d'utilisation pour l'utilisateur

| Moyen de transport | Coût d'utilisation pour l'utilisateur (\$ CA) | |
|--------------------|---|----------|
| | Formule | Résultat |
| Avion | $d \times 0,22$ | 132 |
| Train | $(18,4449 + 0,0921 \times d) \times 1,4661$ | 108 |
| Autocar | $d \times 0,11$ | 66 |
| Voiture | $d \times 0,75$ | 452 |

Pour le train, la formule est différente comme expliqué à la sous-section 3.1.2. De même que précédemment, les performances sont évaluées par comparaison avec celle de l'avion. Ainsi, le train et l'autocar ont reçu la note +1 et la voiture de location la note de -1, leur note pondérée sont identiques puisque la pondération de ce critère est de 1.

La concordance entre la durée effective du voyage, le coût d'utilisation et la *Value of travel time savings* (VOT) est vérifiée en comparant le tarif qu'un usager est enclin à payer pour réduire son temps de trajet avec le tarif appliqué par les transporteurs. Cette réduction de la durée du transport est calculée en faisant la différence entre le temps de trajet du mode de transport le plus lent avec celui considéré. Le tableau A.4 présente les calculs pour la concordance entre la durée effective du voyage, le coût d'utilisation et la VOT.

Tableau A.4 : Calculs de la concordance entre la durée et la durée effective du voyage, le coût d'utilisation et la VOT

| Concordance entre la durée du voyage, le coût d'utilisation et la VOT (\$ CA) | | | |
|---|---|------------------------------|----------|
| Moyen de transport le plus long : Autocar | | | |
| 520 minutes | | | |
| Moyen de transport | Concordance entre la durée effective du voyage, le coût d'utilisation et la VOT (\$ CA) | | |
| | Durée effective (min) | Formule | Résultat |
| Avion | 70 + 150 = 220 | $((535 - 220)/60) \times 84$ | 441 |
| Train | 257 + 20 = 277 | $((535 - 277)/60) \times 35$ | 151 |
| Autocar | 520 + 15 = 535 | $((535 - 535)/60) \times 18$ | 0 |
| Voiture | 374 | $((535 - 374)/60) \times 23$ | 62 |

Inversement que précédemment, les performances de ces critères ne sont pas évaluées par rapport à l'avion. En effet, pour que le jugement soit pertinent, il vérifie l'infériorité ou l'égalité du tarif payé par les voyageurs avec la somme qu'ils sont prêt à déboursier en fonction du temps gagné grâce au mode de transport. Ainsi, l'autocar et la voiture ont reçu les notes -1, tandis que l'avion et le train ont reçu la note de +1, étant donné que les coûts payés par les utilisateurs sont inférieurs à ce qu'ils sont prêts à payer pour gagner du temps de voyage.